

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Kompenzátor objemu jaderné elektrárny VVER 640

Presurizer of Nuclear Power Plant VVER 640

Student :

Bc. Martin Kocián

Vedoucí diplomové práce :

Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2011

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Kocián**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Kompenzátor objemu jaderné elektrárny VVER 640**
Presurizer of Nuclear Power Plant VVER 640

Zásady pro vypracování:

Navrhněte projekt kompenzátoru objemu a proveďte konstrukční řešení svislých elektroohříváků pro jadernou elektrárnu VVER 640 generace III+ s životností 60 let. Proveďte základní tepelné výpočty a kontrolu pracovní teploty elektroohříváků. Navrhněte odpovídající materiály splňující zadání pro novou generaci jaderných elektráren.

Zadané hodnoty:

| | |
|---------------------|----------|
| Jmenovitý tlak v KO | 15,7 MPa |
| Jmenovitá teplota | 350 °C |

Seznam doporučené odborné literatury:

Rédr, M., Příhoda, M.: Základy tepelné techniky. Praha. SNTL, 1991. ISBN 80-03-00366-0.
Sadik Kakac: Boilers, evaporators, condensers. John Wiley. USA. New York 1991. CIP 90-22486 v knihovně VŠB.
Radko Hejzlar : Stroje a zařízení jaderných elektráren. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03190-X.
Oldřich Mátal: Jaderné reaktory a jejich chlazení. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. ISBN 80-214-2028-6.
František Hezoucký: Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03324-4.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :

.....
podpis

Martin Kocián
Kozlovice 802
739 47

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KOCIÁN, M. *Kompenzátor objemu jaderné elektrárny VVER 640*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2011, 65 s. Vedoucí práce: Kolat, P.

Diplomová práce se zabývá návrhem projektu kompenzátoru objemu včetně konstrukčního řešení svislých elektroohříváčů pro jadernou elektrárnu VVER 640. V této práci jsou provedeny pevnostní výpočty celého pláště kompenzátoru objemu a dále zde jsou uvedeny základní tepelné výpočty a provedena kontrola pracovní teploty elektroohříváčů, která vyhovuje zvolenému materiálu. V další části této práce jsou uvedeny konstrukční materiály použité pro výrobu kompenzátoru, včetně jejich mechanických vlastností a chemického složení. V poslední části je znázorněn postup svařování a kompletace jednotlivých dílů kompenzátoru objemu.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

KOCIÁN, M. *Pressurizer of Nuclear Power Plant VVER 640*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2011, 65 p. Thesis head: Kolat, P.

This thesis is concerned with the design of the project of the pressurizer including the structural design of vertical electroheaters for the power nuclear station VVER 640. In this work are carried out the strength calculations of the whole pressurizer jacket and next there are the basic thermal calculations as well as the check of the gathering temperature of an electroheaters, which agrees with elected material. In the next part of this work are the constructional materials used for the production the pressurizer including mechanical properties and chemical composition. In the last section is visible the procedure of the welding and assembling of an individual parts of pressurizer.

Obsah

| | |
|--|---------------|
| 1. Úvod | - 6 - |
| 2. Seznam použitých zkratk..... | - 7 - |
| 3. Kompenzátor objemu jaderné elektrárny | - 10 - |
| 3.1 Kompenzátory objemu s parním polštářem | - 10 - |
| 3.2 Prostorové uspořádání jednotlivých dílů | - 12 - |
| 4. Matematický model KO | - 13 - |
| 4.1 Popis nerovnovážného stavu..... | - 14 - |
| 4.2 Popis rovnovážného stavu | - 18 - |
| 4.3 Provozní charakteristiky | - 19 - |
| 5. Specifikace konstrukčních materiálů KO a upevňovacích dílů VVER 640..... | - 21 - |
| 5.1 Nízkolegovaná konstrukční ocel 10GN2MFA | - 21 - |
| 5.2 Legovaná konstrukční ocel 38ChN3MFA | - 22 - |
| 5.3 Chromniklová austenitická ocel 08Ch18N10T..... | - 22 - |
| 5.4 Austenitická korozivzdorná ocel třídy 17dle ČSN | - 23 - |
| 5.5 Jakostní uhlíková ocel 22K..... | - 24 - |
| 6. Pevnostní výpočty stěny pláště..... | - 26 - |
| 6.1 Stěna centrálního pláště | - 28 - |
| 6.2 Stěna centrálního pláště (3) a vrchního pláště | - 29 - |
| 6.3 Stěna vrchního dna | - 30 - |
| 6.3.1 Nátrubek průlezu (otvor III) | - 35 - |
| 6.3.2 Nátrubek přívodu sprchové vody nebo odvodu páry (otvory I a II)..... | - 36 - |
| 6.4 Výpočet spodního dna | - 38 - |
| 6.4.1 Nátrubek přívodu primárního chladiva | - 43 - |
| 6.4.2 Nátrubek elektroohříváčů | - 45 - |
| 7. Návrh sprchového systému..... | - 47 - |
| 8. Návrh elektroohříváčů..... | - 49 - |
| 8.1 Výpočet elektroohříváčů..... | - 50 - |
| 8.2 Kontrola pracovní teploty a tepelných toků..... | - 51 - |
| 8.3 Návrh pláště elektroohříváku..... | - 55 - |
| 9. Postup svařování kompenzátoru objemu..... | - 57 - |
| 9.1 Základní zásady svařování a navařování | - 57 - |
| 9.1.1 Postup svařování obvodových svarů tělesa KO 640 | - 57 - |
| 9.1.2 Postup svařování závěrného obvodového svaru (svar B)..... | - 58 - |
| 9.2 Kompletace kompenzátoru objemu | - 59 - |
| 10. Závěr | - 64 - |
| Seznam použité literatury..... | - 65 - |

1. Úvod

V současnosti se zájem o využití energie z jaderných elektráren zvyšuje. Česká republika patří co do technologické úrovně využití jaderné energie k vyspělým státům. V poslední době se díky kolísajícím cenám fosilních paliv a díky nulovému vlivu na globální oteplování jaderná energie dočkává pozornosti. Do budoucna lze proto očekávat příznivý vývoj jaderné energetiky.

Kompenzátor objemu patří mezi důležité komponenty primárního okruhu jaderné elektrárny. Při změně výkonu reaktoru se přechodně nebo trvale změní střední teplota chladiva a v uzavřeném okruhu se změní i tlak chladiva. Z hlediska spolehlivého provozu jaderné elektrárny jsou velké změny tlaku nežádoucí, a proto se pro jejich omezení používá kompenzátor objemu. Jedná se nejčastěji o samostatnou nádobu s uzavřeným pomocným objemem a s plynovým nebo parním polštářem nad hladinou chladiva.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem projektu kompenzátoru objemu a konstrukčním řešením svislých elektroohříváčů pro jadernou elektrárnu VVER 640. Práce je rozdělena do několika částí. V úvodu práce je zde popsán systém kompenzace objemu, všechny hlavní části a jeho funkce v primárním okruhu jaderné elektrárny. Dále je uveden matematický model kompenzátoru objemu s popisem vztahů potřebných k výpočtu.

V další části jsou uvedeny materiály potřebné k výrobě kompenzátoru objemu a následně jsou uvedeny pevnostní výpočty stěny pláště, horního i spodního dna a nátrubků na těchto dnech, spolu s návrhem sprchového systému a návrhem elektroohříváčů.

Nakonec je zde uveden postup svařování a celková kompletace kompenzátoru objemu. Technologie svařování patří pro výrobu kompenzátoru určitě mezi nejdůležitější části.

2. Seznam použitých zkratk

3. kapitola

KO Kompenzátor objemu

4. kapitola

| | | |
|-----------|--|---------------------------|
| L | [m] | výška hladiny |
| P | [kW] | výkon |
| S | [m ²] | plocha |
| T | [°C] | teplota |
| V | [m ³] | objem |
| c | [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹] | měrná tepelná kapacita |
| i | [kJ.kg ⁻¹] | entalpie |
| m | [kg] | hmotnost |
| \dot{m} | [kg.s ⁻¹] | hmotový tok |
| p | [MPa] | tlak |
| v | [m ³ .kg ⁻¹] | měrný objem |
| x | [-] | suchost |
| α | [kW.m ⁻² .K ⁻¹] | součinitel přestupu tepla |
| τ | [s] | čas |

indexy

| | | | |
|----|---------------------------------|---|-------------------|
| 1 | voda | k | kondenzát ze stěn |
| 2 | pára | p | primární okruh |
| 3 | sprchy | r | regulace hladin |
| e | elektroohřívač | s | střední hodnota |
| h | kondenzát na hladině | v | ventily |
| ch | kondenzát na sprchových kapkách | | |

6. kapitola

| | | |
|----------------|--------------------|-------------------------|
| A | [mm ²] | plocha |
| D | [mm] | průměr |
| R | [mm] | poloměr |
| R _p | [MPa] | napětí na mezi kluzu |
| R _m | [MPa] | napětí na mezi pevnosti |

| | | |
|------------------|--------------------|----------------------|
| b_v | [mm] | vzdálenost výšky dna |
| c | [mm] | výrobní přídavek |
| d | [mm] | průměr otvorů |
| h | [mm] | výška |
| l | [mm] | vzdálenost |
| n | [-] | počet otvorů |
| p | [MPa] | tlak |
| s | [mm] | tloušťka stěny |
| Σ | [mm ²] | plocha |
| α, γ | [°] | úhly |
| σ | [MPa] | napětí |
| φ | [-] | součinitel oslabení |

indexy

| | | | |
|---------------|-----------------------------|-----|---------------------------------|
| 0 | minimální hodnota | ch | nátrubek přívodu prim. chladiva |
| 1,2 | označení konkrétních otvorů | k | obvodová hodnota |
| D | dovolená hodnota | n | průměrná hodnota |
| N | nominální hodnota | s | střední hodnota |
| R | výpočtová hodnota | as | vnější rozměr |
| c | celková hodnota | max | maximální rozměr |
| d | diagonální hodnota | mez | mezní hodnota |
| $d_1 d_2 d_3$ | označení konkr. otvorů | min | minimální hodnota |

8. kapitola

| | | |
|-------|----------------------|----------------------|
| L | [mm] | délka topného tělesa |
| P | [W.cm ²] | tepelný tok |
| Q | [W] | výkon |
| Q^* | [W.cm ³] | zdrojové teplo |
| S | [mm ²] | plocha |
| U | [V] | napětí |
| a | [mm] | šířka |
| d | [mm] | průměr |
| h | [mm] | stoupání spirály |
| l_d | [mm] | délka topného odporu |
| q | [W.cm ²] | měrný tepelný tok |

| | | |
|-----------|---|------------------|
| r | [mm] | poloměr |
| t | [°] | teplota |
| λ | [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] | tepelná vodivost |
| ρ | [Ω .mm ⁻² .m ⁻¹] | měrný odpor |

indexy

| | |
|-----|-------------------------------|
| c | celková hodnota |
| j | jednotková hodnota |
| s | střední hodnota |
| 1-5 | označení jednotlivých průměrů |

9. kapitola

KTZ konečné tepelné zpracování

TZ tepelné zpracování

3. Kompenzátor objemu jaderné elektrárny [1]

Systém kompenzace objemu (tlaku) chladiva jaderného reaktoru je nezávislým systémem reaktoru, připojeným k primárnímu okruhu, sloužícím k vyrovnávání tlakových změn v primárním okruhu, které vznikají vlivem tepelných dilatací chladiva.

Kompenzátor objemu (tlaku) chladiva jaderného reaktoru je částí systému kompenzace objemu chladiva reaktoru, která plní funkci regulátoru tlaku a objemu kapalného chladiva v primárním okruhu. Pracuje jako vyrovnávací nádrž, doplňující nebo odebírající kapalně chladivo z primárního okruhu při změnách jeho objemu vlivem tepelné dilatace.

Kompenzátory objemu můžeme dělit na:

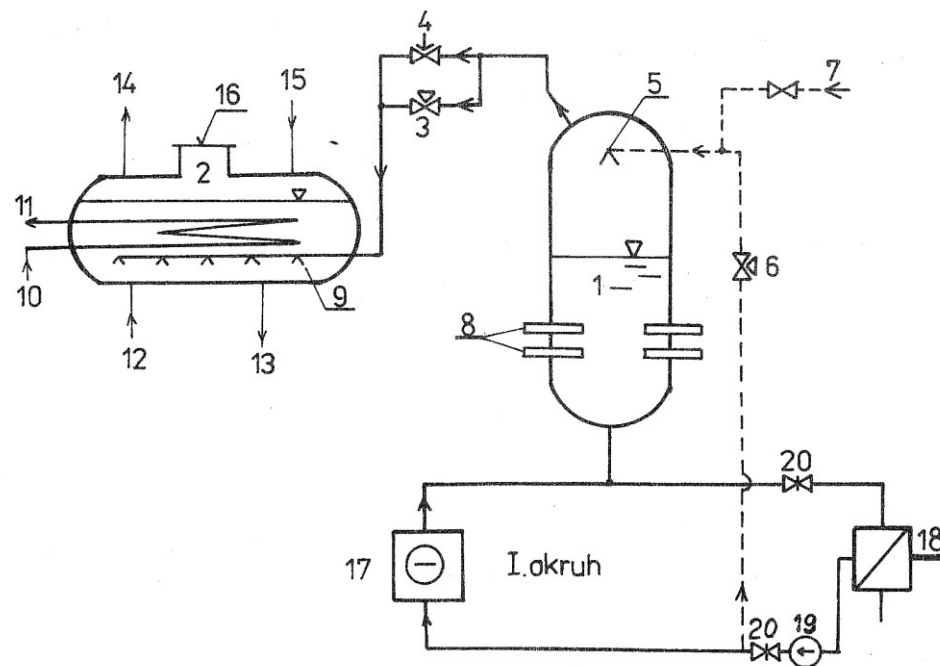
1. kompenzátory objemu s plynovým polštářem
2. kompenzátory objemu s parním polštářem.

3.1 Kompenzátory objemu s parním polštářem [1]

Těmito kompenzátory jsou vybaveny všechny u nás postavené elektrárny s tlakovodními reaktory.

Systém kompenzace objemu (tlaku) chladiva s KO s parním polštářem se skládá z těchto hlavních součástí :

1. kompenzátor objemu
2. barbotážní (přepouštěcí) nádrž
3. pojistné, regulační a jiné ventily a příslušenství.



Obr. 3.1 - Schéma zapojení kompenzátoru objemu s parním polštářem [1]

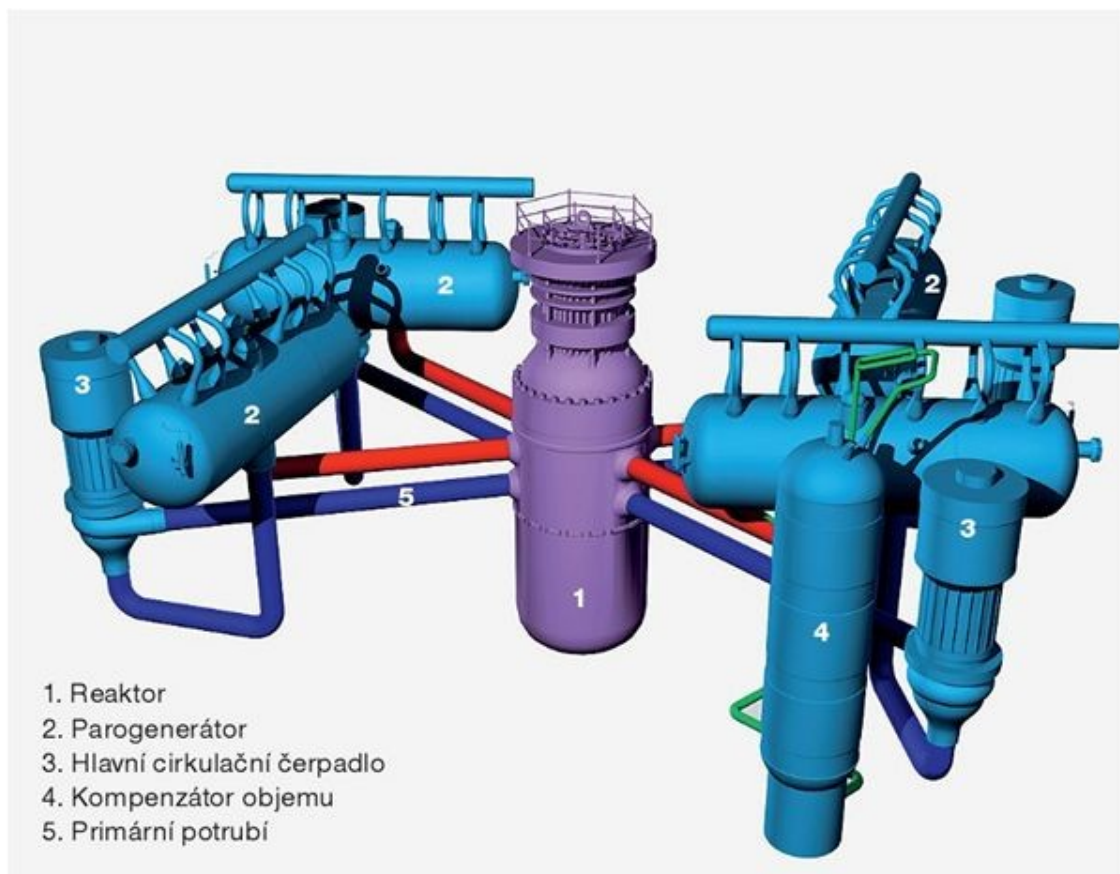
- 1 – kompenzátor objemu
- 2 – barbotážní nádrž
- 3 – ventily pro přepouštění páry z KO do barbotážní nádrže
- 4 – pojistné ventily pro přepouštění páry z KO do barbotážní nádrže
- 5 – vstřikovací trysky
- 6 – regulační ventil vstřikované vody
- 7 – přívod vody od doplňovacích čerpadel
- 8 – elektrické ponorné ohříváky
- 9 – otvory (trysky) jimiž se přivádí pára z KO do vodního prostoru barbotážní nádrže
- 10 – přívod chladicí vody do trubkových hadů, ochlazujících barbotážní nádrž
- 11 – výstup chladicí vody
- 12 – přívod čistého kondenzátu
- 13 – odvod vody do nádrže nečistého kondenzátu
- 14 – odvod vodíku k systému spalování
- 15 – přívod dusíku do barbotážní nádrže
- 16 – pojistná havarijní membrána
- 17 – reaktor
- 18 – parní generátor
- 19 – hlavní cirkulační čerpadlo
- 20 – hlavní uzavírací šoupátko

Kompenzátor objemu (1) má svůj vodní prostor trvale potrubím spojen s neoddělitelnou částí horké větve jedné ze smyček primárního okruhu. Jelikož se KO nachází výše než primární okruh, shromažďují se v něm též plyny uvolněné v primárním okruhu. Vyrovnávání tlaku v KO je prováděno pomocí parního polštáře nad vodní hladinou. Dojde-li k poklesu tlaku v KO, zapnou se automaticky elektrické ohříváky vody (8), nastává var, vývin páry a tlak stoupá. Po dosažení předepsaného tlaku se ohříváky samočinně vypnou. Je-li naopak zapotřebí snížit tlak, otevře se regulační ventil (6) a voda ze studené větve jedné ze smyček primárního okruhu (na výtlačné straně čerpadla (19)) se tryskami (5) rozprašuje do parního prostoru KO. Tím dochází k ochlazení a kondenzaci páry a ke snížení tlaku. Snížení tlaku může provádět též operátor z blokové dozorny přepouštěním páry přes přepouštěcí ventily (3) do barbotážní nádrže (2). V případě velkého zvýšení tlaku se samočinně otevřou pojistné ventily (4) a přepustí páru do barbotážní nádrže. Pára je zaváděna do vodního prostoru této nádrže otvory (9), aby byla urychlena její kondenzace. Voda v barbotážní nádrži je ochlazována trubkovými hady, jimiž proudí chladicí voda (10). Jelikož se z KO s parou přivádějí do barbotážní nádrže i jiné nekondenzující plyny, zejména vodík, vytvářející třaskavý plyn, musí být koncentrace vodíku v barbotážní nádrži snižována (pod 2,5%) přívodem dusíku (15). Vodík s nekondenzujícími plyny je odváděn potrubím (14) na spalovací zařízení.

Pro případ selhání chladicího systému je barbotážní nádrž opatřena pojistnou havarijní membránou (16), která se při překročení maximálního tlaku protrhne a zabrání prasknutí barbotážní nádrže.

3.2 Prostorové uspořádání jednotlivých dílů

Pro názornost uvádím schéma uspořádání jednotlivých dílů v primárním okruhu jaderné elektrárny, kde můžeme vidět všechny důležité části včetně kompenzátoru objemu. Spodní část KO je napojena na teplou větev a horní část, kde se nachází sprchový systém je napojena na studenou větev primárního potrubí.



Obr. 3.2 - Prostorové uspořádání kolem reaktoru [2]

4. Matematický model KO [3]

Pro stanovení časové závislosti termodynamických parametrů chladiva v KO jsou bilanční rovnice pro objem, hmotnost a energii uvažovány s pohyblivými hranicemi s časovou změnou objemu primárního chladiva. Při termodynamicky nerovnovážném režimu se bilanční rovnice píší zvlášť pro parní a vodní objem a uvažuje se vzájemné působení mezi nimi. V rovnovážném stavu se rovnice formují společně pro objem vody a páry v KO.

Parametry vody v KO jsou tedy ovlivňovány:

1. časovou změnou objemu prim. chladiva Q_{vp} , která je závislá na změně středního tlaku a teploty v primárním okruhu - p_l , t_l , hmotový tok vody z prim. okruhu je \dot{m}_p , měrný objem v_p .
2. tepelným výkonem elektroohříváčů P_e
3. dodávkou sprchovací vody s průtokem \dot{m}_s a entalpií i_s
4. únikem chladiva přes pojistné ventily \dot{m}_v

4.1 Popis nerovnovážného stavu [3]

Změna objemu vytlačeného primárního chladiva je popsána rovnicí:

$$Q_{vp} = f(\tau) = f(pt) = (\dot{m}_p + \dot{m}_r) \cdot v_p \quad (4.1)$$

Zadáva se jako vstupní veličina v závislosti na čase, resp. na středním tlaku a teplotě v primárním okruhu. Hmotnost vody v KO s prim. chladivem se zvětšuje dodávkou vody ze sprchového systému a také v důsledku kondenzace páry na vodní hladině, sprchových kapkách a stěnách a snižuje v důsledku odparu při činnosti elektroohříváčů.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_s + \dot{m}_h + \dot{m}_{ch} + \dot{m}_k + \dot{m}_p + \dot{m}_r - \dot{m}_e \quad (4.2)$$

Hmotnost vody zkondenzované na sprchových kapkách za čas se určí dle vztahu

$$\dot{m}_{ch} = \frac{\dot{m}_s \cdot (i' - i'')}{i' - i''} \quad (4.3)$$

kde předpokládáme, že na hladinu dopadne sytá voda

Činnosti elektroohříváčů vzniká pára

$$\dot{m}_e = \frac{P_e}{i' - i''} \quad (4.4)$$

Tepelný výkon přecházející z páry do stěny je dán vztahem

$$P_I = \alpha_I \cdot S_I \cdot (T'' - t') \quad (4.5)$$

kde S_I je plocha stěn KO nad hladinou a je funkcí výšky hladiny, součinitel α_I se volí $0,3 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{deg}^{-1}$.

Hmotový tok zkondenzované vody ze stěn

$$\dot{m}_k = \frac{P_I}{h'' - t'} \quad (4.6)$$

Tepelný výkon z páry na hladinu

$$P_{II} = \alpha_{II} \cdot S_{II} \cdot (T'' - t') \quad (4.7)$$

kde S_{II} je plocha hladiny a součinitel přestupu tepla α_{II} volíme $100 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{deg}^{-1}$.

Na hladině dochází ke kondenzaci

$$\dot{m}_h = \frac{P_{II}}{h'' - t'} \quad (4.8)$$

Změnu celkového množství hmoty v KO lze určit podle vztahu

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_s + \dot{m}_v + \dot{m}_p + \dot{m}_r \quad (4.9)$$

Odvedený tepelný výkon z vody do stěn je určen vztahem

$$P_{III} = \alpha_{III} \cdot S_{III} \cdot (T_1 - t_s) \quad (4.10)$$

kde S_{III} je plocha stěn KO pod hladinou a součinitel α_{III} volíme $3 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{deg}^{-1}$.

Tepelný výkon dodávaný z páry do stěn v nerovnovážném stavu pro její udržení na mezi sytosti určíme

$$P_{IV} = \dot{m}_2 \cdot \left(\frac{di''}{dp} - v'' \right) p \quad (4.11)$$

Pak se změna střední teploty stěny KO vypočte

$$T_s = \frac{P_I + P_{III} + P_{IV}}{c_s} \quad (4.12)$$

kde c_s je tepelná kapacita KO

$$c_s = 0,5 \cdot m_{KO} \cdot c_{Fe} \quad (4.13)$$

Výsledná diferenciální rovnice pro časovou změnu tlaku páry je

$$\dot{p} = \frac{\dot{m}_2 \cdot v'' - \dot{m}_2}{m_2 \cdot E_3} \quad (4.14)$$

kde

$$\dot{m}_2 = \dot{m} - \dot{m}_1 = \dot{m}_e - \dot{m}_{ch} - \dot{m}_k - \dot{m}_v - \dot{m}_h \quad (4.15)$$

Funkce E_3 se definuje jako

$$E_3 = E_1 \cdot \left(\frac{di''}{dp} - v'' \right) - \frac{tv''}{dp} \quad (4.16)$$

$$E_1 = \frac{v'' - v'}{i'' - i'} \quad (4.17)$$

Změnu entalpie vody za čas určíme

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{P_e + P_{II} - P_{III} \cdot \left(\dot{m}_s + \dot{m}_k + \dot{m}_h + \dot{m}_{ch} \right) (i - i_1) + \left(\dot{m}_r + \dot{m}_p \right) (i_p - i_1)}{m_1} - v'' \cdot p \quad (4.18)$$

Střední entalpie chladiva v KO

$$i = \frac{n_1 \cdot i_1 + n_2 \cdot i''}{m} \quad (4.19)$$

a její změna

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{\left(n_1 \cdot i_1 + n_1 \cdot \frac{di_1}{dp} + n_2 \cdot i'' + n_2 \cdot \frac{di''}{dp} \right) m - n \cdot (m_1 \cdot i_1 + n_2 \cdot i'')}{m^2} \quad (4.20)$$

Změna výšky hladiny v KO se určí

$$\frac{dL}{d\tau} = \frac{\left(n_1 \cdot \frac{dv_1}{dp} \cdot p - i_1 \cdot m_1 \right) S_H}{m^2} \quad (4.21)$$

Přítok (odtok) primárního chladiva je v modelu řešen jako funkce střední teploty a tlaku v primárním okruhu a činnosti sprchového systému odebírajícího vodu ze studené větve primárního okruhu.

$$m_p = \frac{V_I \cdot (v_0 - v_1)}{\tau - \tau_s} - n_s \quad (4.22)$$

kde V_I - objem chladiva v primárním okruhu

v_0 - měrný objem na počátku kroku

v_1 - měrný objem na konci kroku

$\tau - \tau_s$ - délka kroku

Rovnice (4.1-2-9-12-14-18-20-21) tvoří systém osmi diferenciálních rovnic pro řešení přechodových jevů v KO.

Při splnění podmínky $i_1 \geq i''$ přejde nerovnovážný režim v rovnovážný.

4.2 Popis rovnovážného stavu [3]

Bilanční rovnice se formulují společně pro objem vody a páry v KO. V platnosti zůstávají rovnice (4.1-2-9-12-18-21).

Časová změna tlaku se počítá z rovnice energetické bilance pro celý objem KO a má tvar

$$p = \frac{E_1 \cdot \left(\rho_e - \rho_l - \rho_{III} + \eta_s \cdot (i_s - i') - \eta_v \cdot (i'' - i') + (\dot{n}_r + \dot{n}_p) \cdot (i' - i') \right) + \dot{m} \cdot h}{m_1 \cdot E_2 + \eta_2 \cdot E_3} \quad (4.23)$$

kde

$$E_2 = \eta_1 \cdot \left(\frac{di'}{dp} - v' \right) - \frac{v'}{dp} \quad (4.24)$$

Změna střední entalpie

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{P_e - \rho_l - \rho_{III} + \eta_s \cdot (i_s - i') - \eta_v \cdot (i'' - i') + (\dot{n}_r + \dot{n}_p) \cdot (i' - i')}{m} + v' \cdot p \quad (4.25)$$

když

$$x = \frac{i_s - i'}{i'' - i'} \quad (4.26)$$

$$v = v' + x \cdot (v'' - v') \quad (4.27)$$

Diferenciální rovnice pro rovnovážný a nerovnovážný stav tvoří uzavřený systém, který je řešitelný procedurami pro výpočet:

$$i'; i''; v'; v''; T' = f(p)$$

$$v; T = f(i')$$

Tento program je již zpracován pro modelování stavu kompenzátoru objemu jaderné elektrárny VVER 440 a 1000. Rozlišení obou typů je dáno počátečními podmínkami. Výpočet je prováděn numerickou metodou Runge-Kutta čtvrtého stupně. K odvození rovnic bylo použito Newtonova obecného interpolačního polynomu.

$$P(x) = y_0 + q_1(x-x_0) + r_2(x_1-x)(x_0-x) + s(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2) + \dots$$

kde $q_1, r_2, s_3, t_4 \dots$ jsou koeficienty vypočítané programem.

4.3 Provozní charakteristiky

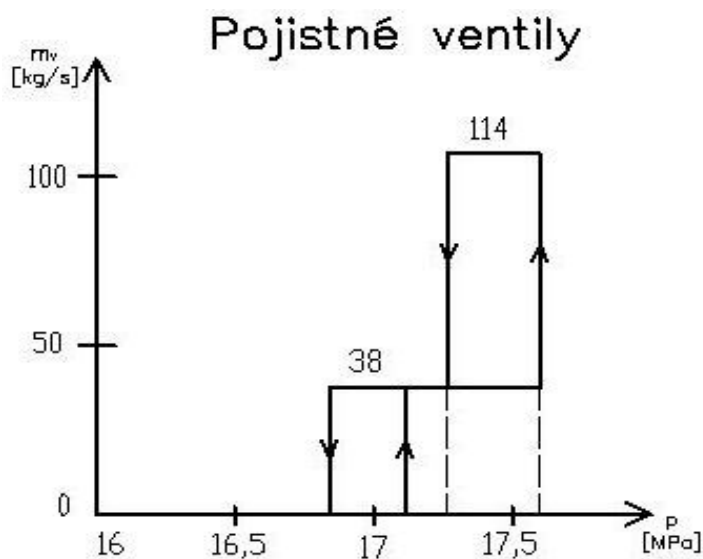
Průtok páry pojistnými ventily závisí na odchylce tlaku od počáteční hodnoty. Entalpie unikající páry je rovná entalpii na horní mezní křivce při daném tlaku.

Průtok sprchovací vody je ovlivněn tlakem v KO a entalpii, která je závislá na tlaku a teplotě ve studené větvi primárního okruhu.

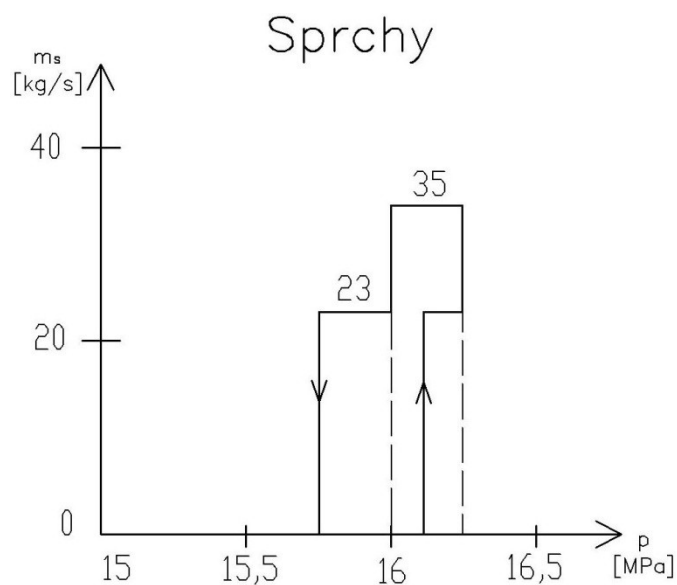
Tepelný výkon elektroohříváčů závisí také na tlaku v KO a předpokládá se, že celý tepelný výkon se předává do vodního objemu.

Všechny tyto provozní charakteristiky jsou uvedeny na obrázcích a podrobně popsány tabulkami.

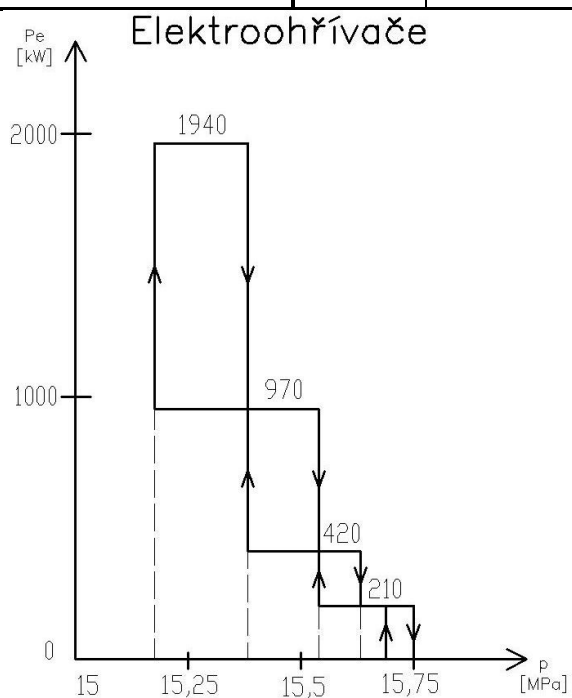
Obr. 4.1 Provozní charakteristiky



| Pojistné ventily | jednotka | 1. | 2. |
|-------------------|----------|------|------|
| Otevírací tlak | MPa | 17,2 | 17,6 |
| Zavírací tlak | MPa | 16,9 | 17,3 |
| Průtočné množství | kg/s | 38 | 114 |



| Sprchový systém | jednotka | Hlavní | Rezervní |
|-------------------|----------|--------|----------|
| Otevírací tlak | MPa | 16,1 | 16,3 |
| Zavírací tlak | MPa | 15,8 | 16 |
| Průtočné množství | kg/s | 23 | 12 |
| maximální průtok | kg/s | 35 | |



| Elektroohříváče | jednotka | 1. | 2. | 3. | 4. |
|-----------------|----------|-------|-------|-------|------|
| Zapínací tlak | MPa | 15,7 | 15,55 | 15,4 | 15,2 |
| Vypínací tlak | MPa | 15,75 | 15,65 | 15,55 | 15,4 |
| Výkon | kW | 210 | 210 | 550 | 970 |
| Celkový výkon | kW | 1940 | | | |

5. Specifikace konstrukčních materiálů KO a upevňovacích dílů VVER 640 ^[4]

5.1 Nízkolegovaná konstrukční ocel 10GN2MFA

Nízkolegovaná konstrukční ocel se používá pro výrobu výkovků a výlisků pláště kompenzátoru objemu a pro výrobu plechů upevňovacích dílů kompenzátoru objemu VVER 640.

Tab. 5.1 - Tavbové chemické složení nízkolegované konstrukční oceli 10GN2MFA

| Značka oceli | Obsah prvků v % | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------|-----------|-------------|------|------|-----|-----------|------|-------------|-------------------------|
| | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V |
| 10GN2MFA | 0,08 ÷ 0,12 | 0,8 ÷ 1,1 | 0,17 ÷ 0,37 | max. | | | 1,7 ÷ 2,7 | max. | 0,40 ÷ 0,70 | 0,03 ÷ 0,07 dle výpočtu |
| | | | | 0,02 | 0,02 | 0,3 | | 0,3 | | |

Tab. 5.2 - Mechanické vlastnosti nízkolegované konstrukční oceli 10GN2MFA

| Značka oceli | t = 20°C | | | | | t = 350°C | | | | t = -10°C | t _{ko} |
|-----------------|--------------------|-------------------------|---------------|--------------|-------------------|--------------------|-------------------------|---------------|--------------|---|---------------------------------|
| | Mez kluzu Rp [MPa] | Pevnost v tahu Rm [MPa] | Tažnost A [%] | Zůžení Z [%] | Zkouška lánavosti | Mez kluzu Rp [MPa] | Pevnost v tahu Rm [MPa] | Tažnost A [%] | Zůžení Z [%] | Vrubová houževnatost KCV [J/cm ²] | Kritická teplota křehkosti [°C] |
| | min. | | | | | min. | | | | max. | |
| 10GN2MFA | 343 | 539 | 16 | 55 | α=50° D=2a | 294 | 490 | 14 | 50 | 25 | 15 |

5.2 Legovaná konstrukční ocel 38ChN3MFA

Tyto legované konstrukční oceli odolné vůči náhlým změnám teploty se používají pro výrobu spojovacích dílů kompenzátoru objemu VVER 640

Tab. 5.3 - Tavbové chemické složení legované konstrukční oceli 38ChN3MFA

| Značka oceli | Obsah prvků v % | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------|-------------|-------------|-------|-------|------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | V |
| 38ChN3MFA | 0,33 ÷ 0,40 | 0,25 ÷ 0,50 | 0,17 ÷ 0,37 | max. | | | 3,0 ÷ 3,5 | max. | 0,35 ÷ 0,45 | 0,10 ÷ 0,18 |
| | | | | 0,025 | 0,015 | 0,30 | | 1,2 ÷ 1,5 | | |

Tab. 5.4 – Mechanické vlastnosti nízkolegované konstrukční oceli 38ChN3MFA

| Značka oceli | t = 20°C | | | | | | t = 350°C | | |
|---|--------------------|----------------------------|---------------|--------------|--|--------------|-----------------------|----------------------------|--------------|
| | Mez kluzu Rp [MPa] | Pevnost v tahu Rm [MPa] | Tažnost A [%] | Zúžení Z [%] | Vrbová houževnatost KCV [J/cm ²] | Tvrdość HB | Mez kluzu Rp [MPa] | Pevnost v tahu Rm [MPa] | Zúžení Z [%] |
| | | min. | | | | | min. | | |
| 38ChN3MFA Šrouby průlezů a elektroohříváčů | 784 ÷ 951 | 882 | 14 | 40 | 59 | 262 ÷ 311 | 635 | 745 | 40 |

5.3 Chromniklová austenitická ocel 08Ch18N10T

Austenitická chromniklová ocel je používána při výrobě dílů kompenzátoru objemu VVER640. Ocel musí být odolná proti mezikrystalové korozi.

Tab. 5.5 - Tavbové chemické složení chromniklové austenitické oceli 08Ch18N10T

| Značka oceli | Obsah prvků v % | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------|----|-----|-------|------|-----|---------------|----------------|--------------------|------|------|
| | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Ti | Co | N |
| 08Ch18N10T | max. | | | | | | 9,0 ÷ 11,0 | 17,0 ÷ 19,0 | 5×C max. 0,7 | max. | |
| | 0,08 | 2 | 0,8 | 0,035 | 0,02 | 0,3 | | | | 0,05 | 0,05 |

Tab. 5.6 – Mechanické vlastnosti chromniklové austenitické oceli 08Ch18N10T

| Značka oceli | t = 20°C | | | | t = 350°C | | |
|--------------|--------------------|-------------------------|---------------|--------------|--------------------|-------------------------|--------------|
| | Mez kluzu Rp [MPa] | Pevnost v tahu Rm [MPa] | Tažnost A [%] | Zúžení Z [%] | Mez kluzu Rp [MPa] | Pevnost v tahu Rm [MPa] | Zúžení Z [%] |
| | min. | | | | | | |
| 08Ch18N10T | 196 | 490 | 38 | 50 | 177 | 353 | 40 |

5.4 Austenitická korozivzdorná ocel třídy 17 dle ČSN

Austenitická korozivzdorná ocel třídy 17 je používána při výrobě nosných částí kompenzátoru objemu, které nejsou namáhané tlakem teplotnosného media primárního nebo sekundárního okruhu VVER 640. Ocel musí být odolná proti mezikrystalové korozi. Jedná se především o ocel 17 247 dle ČSN 41 7247, která může být nahrazena oceli 17 246 dle ČSN 41 7246, 17 248 dle ČSN 41 7248, 17 347 dle ČSN 41 7347.

Tab. 5.7 - Chemické složení austenitických korozivzdorných ocelí třídy 17 dle ČSN

| Značka oceli | Obsah prvků v % | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|----|-----|-------|------|----------------|----------------|------|----------------|
| | C | Mn | Si | P | S | Ni | Cr | Ti | Mo |
| | max. | | | | | | | min. | |
| 17 246 | 0,12 | 2 | 1 | 0,045 | 0,03 | 8,0 ÷ 11,0 | 17,0 ÷ 20,0 | 5×C | - |
| 17 247 | 0,08 | 2 | 1 | 0,045 | 0,03 | 9,50 ÷ 12,0 | 17,0 ÷ 19,0 | 5×C | - |
| 17 248 | 0,1 | 2 | 1 | 0,045 | 0,03 | 9,50 ÷ 12,0 | 17,0 ÷ 19,0 | 5×C | - |
| 17 347 | 0,12 | 2 | 1,5 | 0,045 | 0,03 | 9,0 ÷ 12,0 | 16,0 ÷ 19,0 | 5×C | 1,50 ÷ 2,50 |

Tab. 5.8 – Mechanické vlastnosti austenitických korozivzdorných ocelí třídy 17 dle ČSN

| Značka oceli, druh polotovaru | | t = 20°C | | |
|-------------------------------|--------------|-----------------------|----------------------------|---------------|
| | | Mez kluzu Rp [MPa] | Pevnost v tahu Rm [MPa] | Tažnost A [%] |
| | | | | min. |
| 17 247 plechy | tl. < 10 mm | 205 | 500 ÷ 750 | 30 |
| | tl. 10÷30 mm | | | 26 |
| 17 247 tyče Φ < 60 mm | | | | 40 |
| 17247 trubky | | | | 35 |

5.5 Jakostní uhlíková ocel 22K

Jakostní uhlíková ocel se používá k výrobě dílů kompenzátoru objemu a upevňovacích dílů KO VVER 640

Tab. 5.9 - Tavbové chemické složení jakostní uhlíkové oceli 22K

| Značka oceli | Obsah prvků v % | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------|-------------|-------------|------|------|-----|-----------|------|------|------------|-------------|
| | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Ti | Mo | V |
| | max. | | | | | | 0,3 ÷ 0,5 | max. | | 0,1 ÷ 0,15 | 0,02 ÷ 0,05 |
| 22K | 0,19 ÷ 0,26 | 0,75 ÷ 1,05 | 0,20 ÷ 0,45 | 0,03 | 0,03 | 0,3 | | 0,3 | 0,05 | | |

Tab. 5.10 – Mechanické vlastnosti jakostní uhlíkové oceli 22K

| Značka oceli | t = 20°C | | | | | t = 350°C | | | t _{ko} |
|--------------|--------------------|-------------------------|---------------|--------------|--|--------------------|-------------------------|--------------|---------------------------------|
| | Mez kluzu Rp [MPa] | Pevnost v tahu Rm [MPa] | Tažnost A [%] | Zúžení Z [%] | Vrbová houževnatost KCV [J/cm ²] | Mez kluzu Rp [MPa] | Pevnost v tahu Rm [MPa] | Zúžení Z [%] | Kritická teplota křehkosti [°C] |
| | min. | | | | | min. | | | max. |
| 22 K výkovky | 216 | 431 | 21 | 45 | 39 | 186 | 353 | 44 | 15 |
| 22 K plechy | 216 | 431 | 20 | 40 | 39 | 186 | 353 | 40 | 20 |

6. Pevnostní výpočty stěny pláště [5]

Základní hodnoty pro výpočet

| | |
|--------------------|------------------------------|
| Jmenovitý tlak | 15,7 MPa |
| Jmenovitá teplota | 350 °C |
| Výpočtový tlak | 18 MPa |
| Výpočtová teplota | 350 °C |
| Pracovní prostředí | voda primárního okruhu, pára |

Základní materiál pro výrobu pláště, dna a nátrubků je materiál 10GN2MFA, pro výpočet budu brát v úvahu mez kluzu R_p a mez pevnosti v tahu R_m pro teplotu 350°C. Pro výpočet budu uvažovat s nižší hodnotou.

$$\sigma_p = \frac{R_p}{n_p} = \frac{294}{1,5} = \underline{\underline{96 \text{ MPa}}} \quad (1)$$

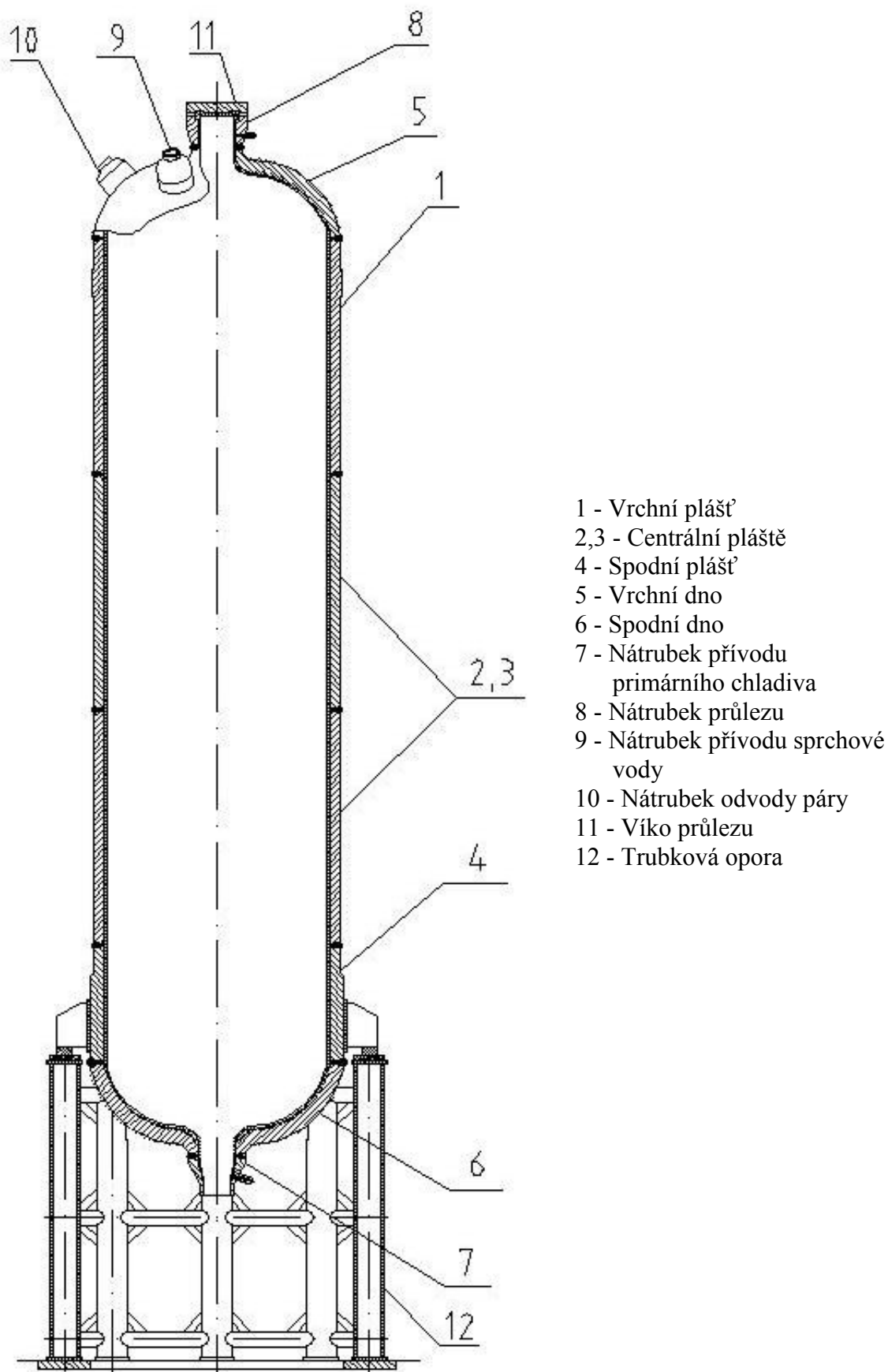
$$\sigma_m = \frac{R_m}{n_m} = \frac{490}{2,6} = \underline{\underline{88,5 \text{ MPa}}} \quad (2)$$

$$\sigma \text{ (výpočtová hodnota)} = \underline{\underline{88,5 \text{ MPa}}}$$

Dle literatury [5]

n_p součinitel bezpečnosti na mezi kluzu volím 1,5

n_m součinitel bezpečnosti na mezi pevnosti volím 2,6



Obr. 6.1 – Schéma kompenzátoru objemu

6.1 Stěna centrálního pláště (2)

Při návrhu tloušťky válcového eliptického dna se vychází z teorie tenkostěnných skořepin namáhaných vnitřním přetlakem. Budeme počítat pouze s dovoleným napětím σ_{\perp} a musíme uvažovat se součinitelem snížení pevnosti φ . Dostaneme tak výpočtovou tloušťku stěny s_R a nominální tloušťku stěny s .

Součinitel snížení pevnosti volím $\varphi = 1$, protože plášť není zeslaben žádným otvorem.

$$s_R = \frac{p \cdot D_v \cdot m_3}{m_2 \cdot (m_1 \cdot \sigma_{\perp} \cdot \varphi - p)} \quad \text{a} \quad s \geq s_R + \delta \quad (3)$$

Výpočtová tloušťka stěny pláště:

Výpočtový vnitřní průměr D_v = navržený vnitřní průměr D + 2 × tloušťka návarů. Celé zatížení nese konstrukční materiál.

$$D = 2310 \text{ mm}$$

$$\text{tloušťka návarů} = 8 \text{ mm}$$

$$D_v = 2310 + 2 \times 8 = 2326 \text{ mm}$$

Hodnoty pro výpočet s_R :

Dle lit. [5]

Tab. 6.1 - Hodnoty pro výpočet s_R

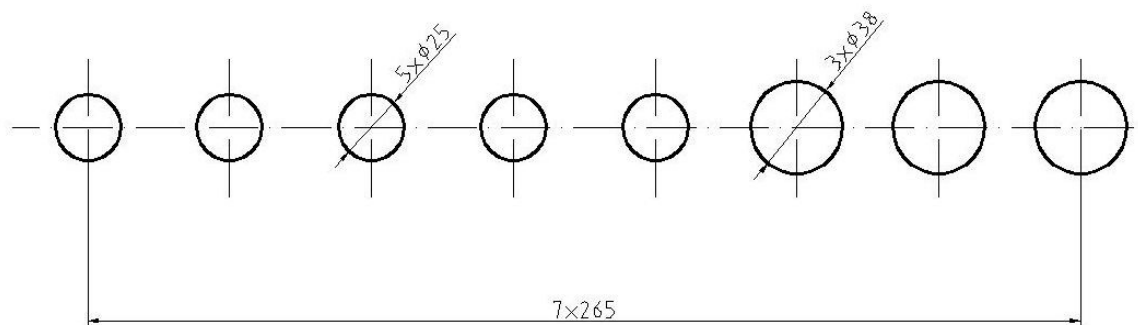
| Část nádoby KO | m_1 | m_2 | m_3 |
|----------------|-------|-------|-------|
| Válcový plášť | 2 | 1 | 1 |
| Eliptické dno | 4 | 1 | 1,75 |

$$s_R = \frac{18 \cdot 2326 \cdot 1}{1 \cdot (2 \cdot 188,5 \cdot 1 - 8)}$$

$$s_R = \underline{\underline{16,6 \text{ mm}}}$$

6.2 Stěna centrálního pláště (3) a vrchního pláště (1)

Tato stěna je zeslabena otvory pro stavoznaky a pomocných termočlánků. Rozměry a rozmístění těchto otvorů jsou znázorněny na obrázku 6.2.



Obr. 6.2 – Rozmístění otvorů v centrálním plášti 3

Podle výpočtové tloušťky stěny volím nominální tloušťku $s_N = 121$ mm, provozní a výrobní přírůstek volím $c = 0$ mm.

Minimální dovolená hodnota koeficientu oslabení

$$\varphi_0 = \frac{v \cdot (D \cdot m_3 + (s_N - c) \cdot m_2)}{m_1 \cdot m_2 \cdot (s_N - c) \cdot \sigma} \quad (4)$$

$$\varphi_0 = \frac{18 \cdot (2310 \cdot 1 + (121 - 0) \cdot 1)}{2 \cdot 1 \cdot (121 - 0) \cdot 188,5} = \underline{\underline{1,959}}$$

Střední průměr pláště

$$D_s = D_v + s_N \quad (5)$$

$$D_s = 1326 + 121 = \underline{\underline{1447 \text{ mm}}}$$

pro $0,66 \leq \varphi_0 < 1$ nesmí průměr otvoru přesahovat mezní hodnotu:

$$d_{mez} = \left(\frac{1,6}{\varphi_0} - 1,4 \right) \sqrt{(D_s \cdot (s_N - c))} \quad (6)$$

$$d_{mez} = \left(\frac{1,6}{1,959} - 0,4 \right) \sqrt{(2447 \cdot (121 - 1))} = \underline{\underline{46 \text{ mm}}}$$

Maximální průměr otvorů

$$d_{max} = 38 \text{ mm} \ll d_{mez} = 146 \text{ mm}$$

Koeficient zeslabení skupinou otvorů pro obvodový směr

$$\varphi = \frac{2 \cdot (l_1 - l_{max})}{l_1} \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{2 \cdot (265 - 8)}{265} = \underline{\underline{0,713}}$$

Vzdálenost os otvorů v plášti $l_1 = 265 \text{ mm}$

$$\varphi = 0,713 \geq \varphi_{\text{min}} = 0,959$$

Otvory ve stěně centrálního pláště 3 není nutno vyztužovat. Pevnostní podmínka vyhovuje $\varphi \geq \varphi_{\text{min}}$. Ve vrchním plášti 1 je stejné rozmístění otvorů, tedy taky vyhovuje.

6.3 Stěna vrchního dna

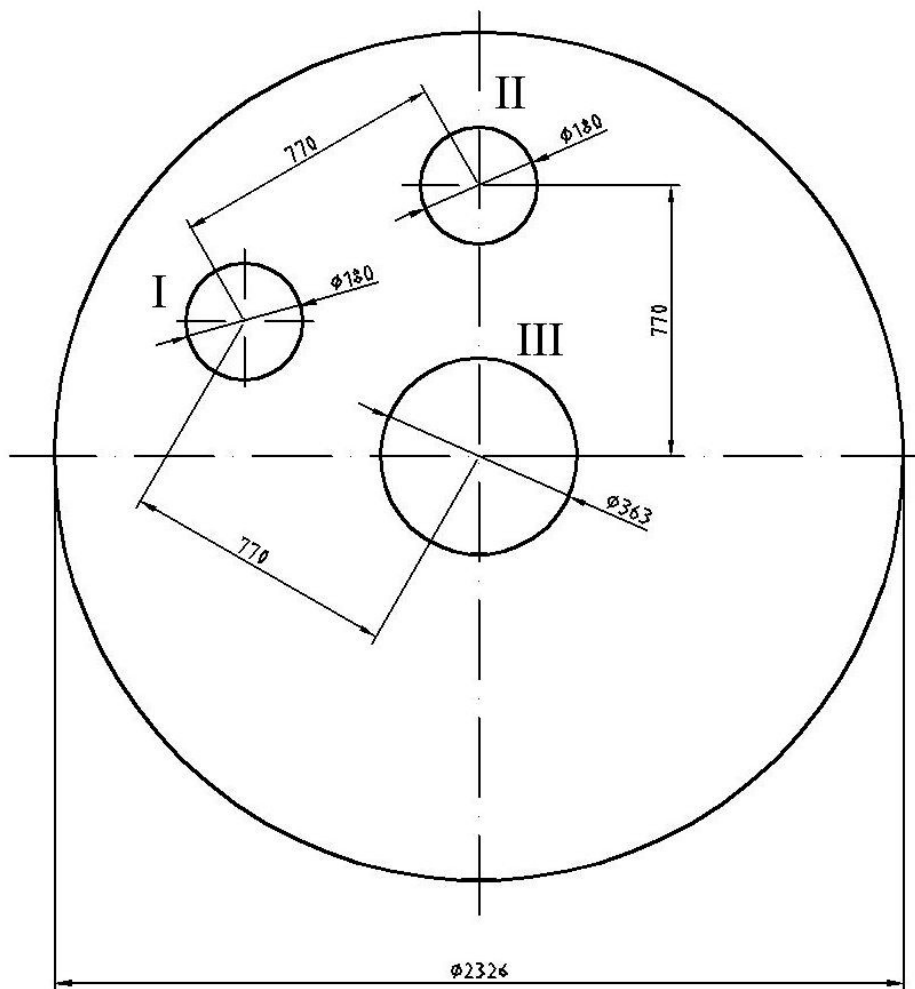
Ve vrchním dně jsou otvory pro nátrubky:

I – Nátrubek přívodu sprchové vody

II – Nátrubek odvodu páry

III – Nátrubek průlezu

Rozmístění otvorů ve vrchním dně je znázorněno na obrázku 6.3



Obr. 6.3 – Rozmístění otvorů ve vrchním dně

Tloušťka stěny s_R

Vypočtu podle vzorce (3) a tabulky (Tab. 6.1)

$$s_{R2} = \frac{18 \cdot 2326 \cdot 1,75}{1 \cdot (4 \cdot 188,5 \cdot 1 - 8)}$$

$$s_{R2} = \underline{\underline{19,6 \text{ mm}}}$$

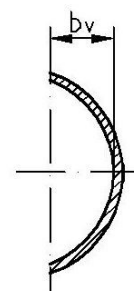
$$\varphi = 1$$

volím $s_N = 117 \text{ mm}$ z důvodu obtížnější výroby otvorů a návaznosti na plášť.

provozní výrobní přídavek volím $c = 4 \text{ mm}$.

Podmínky platnosti výpočtu

$$\frac{b_v}{D_v} = \frac{660}{2326} = 1,2837 \geq 1,2$$



(8)

$$\frac{s_N - c}{D_v} = \frac{117 - 1}{2326} = 0,0486 \leq 0,1 \quad (9)$$

Rozměry otvorů vrchního dna

$$d_{n1} = 180 \text{ mm}$$

$$d_{n2} = 180 \text{ mm}$$

$$d_{n3} = 363 \text{ mm}$$

Minimální dovolená hodnota koeficientu oslabení vrchního dna

počítáno podle vztahu (4)

$$\varphi_0 = \frac{v \cdot (D \cdot m_3 + (s_N - c) \cdot m_2)}{m_1 \cdot m_2 \cdot (s_N - c) \cdot \sigma}$$

$$\varphi_0 = \frac{18 \cdot (2310 \cdot 1,75 + 117 - 1) \cdot 1}{4 \cdot 1 \cdot (117 - 1) \cdot 188,5} = 0,878$$

pro $0,66 \leq \varphi_0 < 1$ nesmí průměr otvoru přesahovat mezní hodnotu:

$$d_{mez} = \left(\frac{1,6}{\varphi_0} - 0,4 \right) \sqrt{(D_s \cdot (s_N - c))} \quad (10)$$

$$d_{mez} = \left(\frac{1,6}{0,878} - 0,4 \right) \sqrt{(2443 \cdot (117 - 1))} = 222 \text{ mm}$$

Střední průměr vrchního dna

$$D_s = D_v + s_N \quad (11)$$

$$D_s = 2326 + 117 = 2443 \text{ mm}$$

$$d_{n1} = d_{n2} < d_{mez} \quad 180 \text{ mm} < 222 \text{ mm}$$

$$d_{n3} > d_{mez} \quad 363 \text{ mm} > 222 \text{ mm}$$

Otvory musíme považovat za řadu otvorů, je-li splněna podmínka pro vzdálenost okrajů dvou sousedních otvorů.

$$l_c \leq 1 \cdot \sqrt{(D_s \cdot (s_N - 1))} \quad (12)$$

$$l_c \leq 1 \cdot \sqrt{(2443 \cdot (117 - 1))} = \underline{\underline{1051 \text{ mm}}}$$

Otvory I a III nebo II a III

Vzdálenost těchto otvorů je $l = 770 \text{ mm}$

$$l_c = 170 - \frac{(d_{n1} + l_{n3})}{2} \quad (13)$$

$$l_c = 170 - \frac{(180 + 63)}{2} = \underline{\underline{499 \text{ mm}}} \quad 499 \text{ mm} < 1051 \text{ mm}$$

Podmínka pro vzdálenost okrajů dvou sousedních otvorů je splněna, otvory je nutno považovat za řadu otvorů.

Otvory I a II

dle vztahu (12) a (13)

$$l_c = 170 - \frac{(180 + 80)}{2} = \underline{\underline{590 \text{ mm}}} \quad 590 \text{ mm} < 1051 \text{ mm}$$

I tyto otvory je nutno považovat za řadu otvorů.

Součinitel zeslabení pro otvory I a III nebo II a III

$$\varphi_{\dots, d3} = \frac{l - l_n}{l} \quad (14)$$

$$\varphi_{\dots, d3} = \frac{770 - 172}{770} = \underline{\underline{1,647}}$$

kde d_n je střední průměr nátrubku I a III nebo II a III

$$d_n = \frac{d_{n1} + d_{n3}}{2} \quad (15)$$

$$d_n = \frac{180 + 63}{2} = \underline{\underline{121,5 \text{ mm}}}$$

Minimální zpevňující plocha pro otvory I a III nebo II a III

$$\Sigma_{\text{min}} = \frac{[(\varphi_{\text{rel},d3} - \varphi_{\text{rel},d3}) \cdot (s_N - \varphi_{\text{rel},d3}) \cdot d_n]}{1 - \varphi_{\text{rel},d3}} \quad (16)$$

$$\Sigma_{\text{min}} = \frac{[(0,878 - 0,647) \cdot (117 - 0) \cdot 272]}{1 - 0,647} = \underline{\underline{10056 \text{ mm}^2}}$$

Součinitel zeslabení pro otvory I a II

podle upravených vztahů (14) a (15)

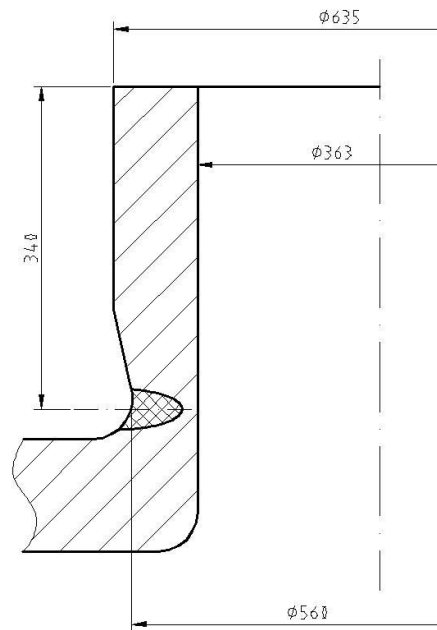
$$\varphi_{\text{rel},d2} = \frac{770 - 80}{770} = \underline{\underline{0,903}}$$

$$d_n = \frac{180 + 80}{2} = \underline{\underline{130 \text{ mm}}}$$

Minimální zpevňující plocha pro otvory I a II

podle upraveného vztahu (16)

$$\Sigma_{\text{min}} = \frac{[(0,878 - 0,903) \cdot (117 - 0) \cdot 180]}{1 - 0,903} = \underline{\underline{1716 \text{ mm}^2}}$$

6.3.1 Nátrubek průlezu (otvor III)**Obr. 6.4 – Nátrubek průlezu (otvor III)**

Výpočet tloušťky s_{R3}

podle upraveného vztahu (3)

$$s_{R3} = \frac{18 \cdot 363}{2 \cdot 188,5 - 8} = \underline{\underline{8,2 \text{ mm}}}, \quad c = 0 \text{ mm}$$

Volím vnější průměr nátrubku $d_{as3} = 560 \text{ mm}$

$$s_{N3} = \frac{d_{as3} - d_{n3}}{2} \tag{17}$$

$$s_{N3} = \frac{560 - 63}{2} = \underline{\underline{18,5 \text{ mm}}}$$

Výška zpevněné části nátrubku

$$h_{s3} = \sqrt{(d_{as3} - d_{N3}) \cdot s_{N3}} \tag{18}$$

$$h_{s3} = \sqrt{(560 - 63) \cdot 18,5} = \underline{\underline{113 \text{ mm}}}$$

Plocha výztuže nátrubku III

$$\Sigma_{\perp} = l \cdot h_{s3} \cdot (s_{N3} - r_{R3} - r) \quad (19)$$

$$\Sigma_{\perp} = l \cdot 213 \cdot (98,5 - 8,2 - r) = \underline{\underline{14241 \text{ mm}^2}}$$

Výpočet víka průřezu

Minimální tloušťka:

$$s_{Rv} = \frac{k}{k_o} \cdot D_1 \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_{\perp}}} \quad (20)$$

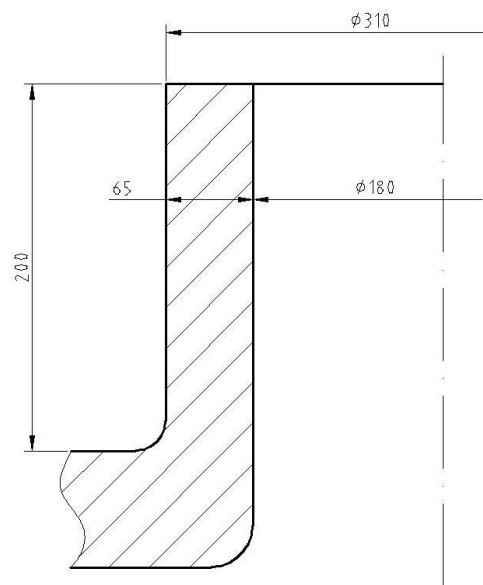
$$s_{Rv} = \frac{0,6}{1} \cdot 540 \cdot \sqrt{\frac{18}{188,5}} = \underline{\underline{100,1 \text{ mm}}}$$

skutečnou tloušťku víka průřezu volím 110 mm.

$k = 0,6$ – tvarový koeficient

$k_o = 1$ – koeficient zeslabení víka otvorem

$D_1 = 540$ – rozteč otvorů pro šrouby

6.3.2 Nátrubek přívodu sprchové vody nebo odvodu páry (otvory I a II)

Obr. 6.5 – Nátrubek pro otvory I a II

Výpočet tloušťky $s_{R1,2}$

podle upraveného vztahu (3)

$$s_{R1,2} = \frac{18 \cdot 180}{2 \cdot 188,5 - 8} = \underline{\underline{17 \text{ mm}}}, \quad c = 0 \text{ mm}$$

Volím vnější průměr nátrubku $d_{as1,2} = 310 \text{ mm}$

$$s_{N1,2} = \frac{d_{as1,2} - d_{n1,2}}{2} \quad \text{podle vztahu (17)}$$

$$s_{N1,2} = \frac{310 - 280}{2} = \underline{\underline{15 \text{ mm}}}$$

Výška zpevněné části nátrubku

podle vztahu (18)

$$h_{s1,2} = \sqrt{(310 - 280) \cdot 55} = \underline{\underline{26 \text{ mm}}}$$

Plocha výztuže nátrubku I a II

podle vztahu (19)

$$\Sigma_{s_{1,2}} = 1 \cdot 126 \cdot (65 - 15 - 15) = \underline{\underline{4127 \text{ mm}^2}}$$

Kontrola pevnosti ploch

$$\Sigma_{s_{1,2}} = 4241 \text{ mm}^2 > \Sigma_{s_{1,2}, \min} = 10056 \text{ mm}^2$$

$$\Sigma_{s_{1,2}} = 4127 \text{ mm}^2 > \Sigma_{s_{1,2}, \min} = 1716 \text{ mm}^2$$

Kontrola skutečných zpevňujících ploch

$$\Sigma_{s_{1,2}} = \frac{\Sigma_{s_{1,2}} + \Sigma_{s_{1,2}}}{2} \quad (21)$$

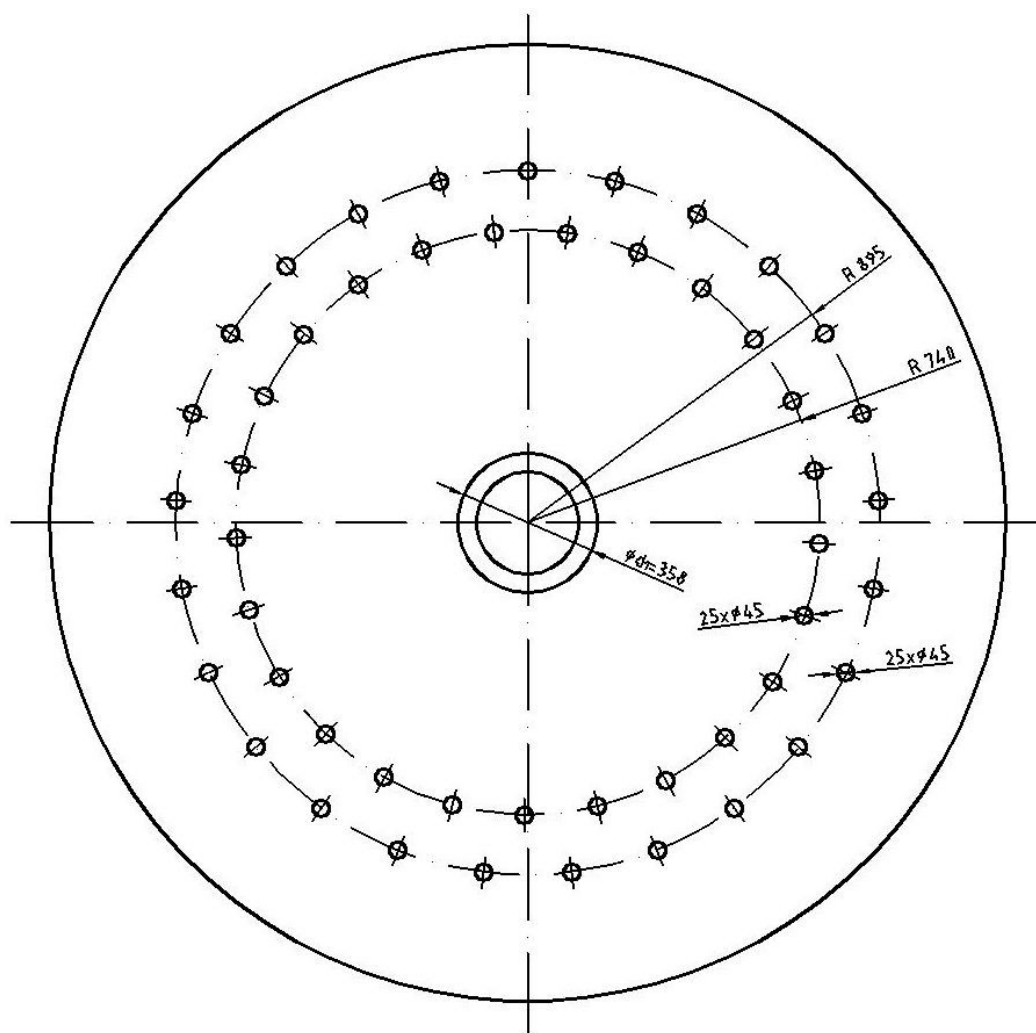
$$\Sigma_{s_{1,2}} = \frac{1 \cdot 4127 + 4241}{2} = \underline{\underline{4184 \text{ mm}^2}}$$

$$\Sigma_{\text{re}} = 14184 \text{ mm}^2 > \Sigma_{\text{re,min}} = 10056 \text{ mm}^2$$

Kontrola rozměrů nátrubků proběhla v pořádku. Rozměry vyhovují.

6.4 Výpočet spodního dna

Ve spodním dně jsou otvory pro elektroohříváky a otvor pro přívod chladiva, který je napojen na studenou větev primárního okruhu. Otvor pro přívod chladiva má průměr $d_1 = 358 \text{ mm}$ a otvorů pro elektroohříváky je $n = 50$ o průměru 45 mm .



Obr. 6.6 – Otvory ve spodním dně

Tloušťka stěny s_R

Vypočtu podle vzorce (3) a tabulky (Tab. 6.1)

$$s_{R2} = \frac{18 \cdot 2326 \cdot 1,75}{1 \cdot (4 \cdot 188,5 \cdot 1 - 8)}$$

$$s_{R2} = \underline{\underline{19,6 \text{ mm}}}$$

Ve spodním dně je velké množství otvorů a větší zatížení. Proto volím tloušťku stěny $s_N = 140 \text{ mm}$. $c = 4 \text{ mm}$

Podmínky platnosti výpočtu dle vztahu (8,9)

$$\frac{b_v}{D_v} = \frac{660}{2326} = \underline{\underline{0,2837}} \quad 0,2 \leq 0,2837 < 0,5$$

$$\frac{s_N - c}{D_v} = \frac{140 - 4}{2326} = \underline{\underline{0,058}} \quad 0,0025 < 0,058 \geq 0,1$$

Podmínka pro vzdálenost okrajů dvou sousedních otvorů

$$l_{\min} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1 - 1 \cdot d}{n} \quad (22)$$

$$l_{\min} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 740 - 15 \cdot 45}{45} = \underline{\underline{41 \text{ mm}}}$$

$$D_s = \lambda_v + s_N \quad \text{dle vztahu (11,12)}$$

$$D_s = 1326 + 40 = \underline{\underline{1466 \text{ mm}}}$$

$$l_c \leq 1 \cdot \sqrt{(D_s \cdot (s_N - c))}$$

$$l_c \leq 1 \cdot \sqrt{(2466 \cdot (140 - 4))} = \underline{\underline{158,2 \text{ mm}}}$$

$$l_{\min} < l_c$$

$$141 \text{ mm} < 158,2 \text{ mm}$$

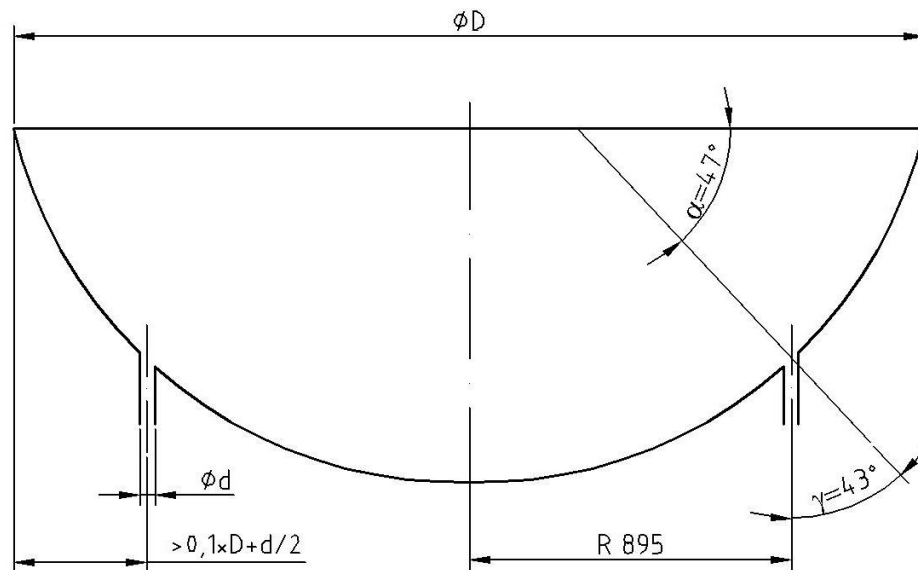
Podmínka splněna, otvory považujeme za řadu otvorů.

Minimální dovolená hodnota koeficientu oslabení

podle vztahu (4) a tabulky (6.1)

$$\varphi = \frac{18 \cdot (2310 \cdot 1,75 + 140 - \cdot) \cdot 1}{4 \cdot 1 \cdot (140 - \cdot) \cdot 188,5} = \underline{\underline{1,733}}$$

Pro eliptická dna platí určité podmínky, které nesmí být porušeny



Obr. 6.7 – Podmínky platnosti pro eliptické dno

1) Úhel mezi normálou ke střednici a osou hrdla nesmí být větší než 45° , úhel γ nabývá největších hodnot pro $R_2 = 895$ mm.

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad \alpha = 47^\circ = 0,8203 \text{ rad} \quad (23)$$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 0,8203 = 0,7505 = \underline{\underline{43^\circ}} < 45^\circ \quad \text{Podmínka vyhovuje}$$

2) Vzdálenost osy otvoru od okraje dna musí být větší než:

$$\frac{D_v}{2} - r_2 \geq 1,1 \cdot D_v + \frac{t}{2} \quad (24)$$

$$\frac{2326}{2} - 95 \geq 1,1 \cdot 2326 + \frac{15}{2} \Rightarrow \underline{\underline{58 \text{ mm} \geq 155,1 \text{ mm}}} \quad \text{Podmínka vyhovuje}$$

3) Podmínky platnosti výpočtu

dle vztahu (8,9)

$$\frac{b_v}{D_v} = \frac{660}{2326} = \underline{\underline{0,2837}}$$

$$0,2 \leq 0,2837 < 0,5$$

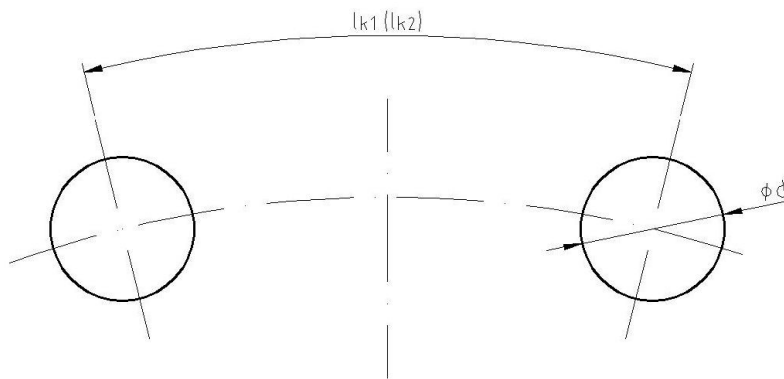
$$\frac{s_N - c}{D_v} = \frac{40 - 1}{2326} = \underline{\underline{0,0158}}$$

$$0,0025 < 0,0158 \geq 0,1$$

$$0,666 < \varphi_0 = 0,733 \leq 1$$

Podmínky vyhovují

Součinitel snížení pevnosti řadou otvorů na spodním dně v obvodovém směru



Obr. 6.8 – Řada otvorů pro EO v obvodovém směru

Pro otvory na poloměru R_1 :

$$l_{k1} = 1 \cdot \pi R_1 \quad (25)$$

$$l_{k1} = 1 \cdot \pi 740 = \underline{\underline{1649,6 \text{ mm}}}$$

$$l_1 = \frac{l_{k1}}{n} \quad (26)$$

$$l_1 = \frac{1649,56}{25} = \underline{\underline{86 \text{ mm}}}$$

$$\varphi_{..1} = \frac{l_1 - l}{l_1} \quad (27)$$

$$\varphi_{..1} = \frac{186 - 5}{186} = \underline{\underline{0,758}} > \varphi_0 = 0,733$$

Pro otvory na poloměru R_2 :

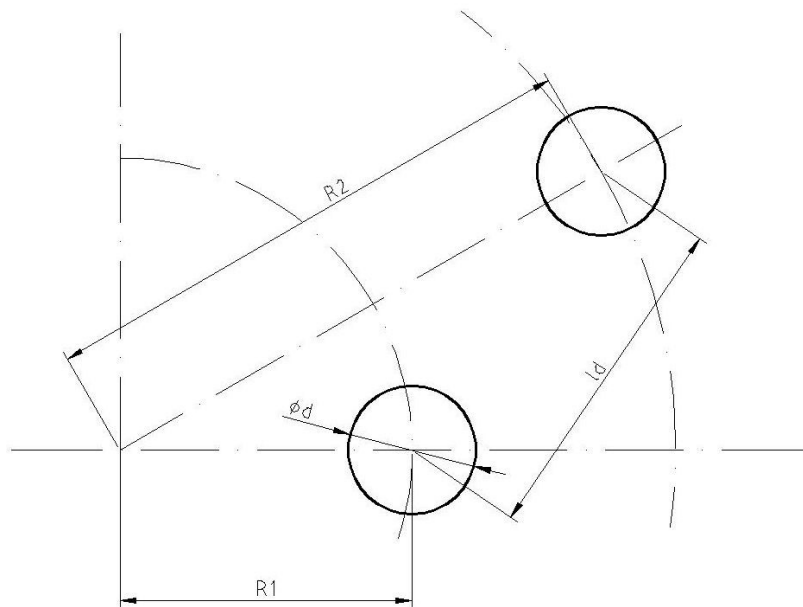
dle upravených vztahů (25,26,27)

$$l_{k2} = 1 \cdot \pi \cdot 395 = \underline{\underline{1223,5 \text{ mm}}}$$

$$l_2 = \frac{1223,5}{25} = \underline{\underline{48,9 \text{ mm}}}$$

$$\varphi_{22} = \frac{48,9 - 0,5}{48,9} = \underline{\underline{1,7999}} > \varphi_0 = 0,733$$

Součinitel snížení pevnosti řadou otvorů na spodním dně v obvodovém směru



Obr. 6.9 - Řada otvorů pro EO v diagonálním směru

$$l_d = 190 \text{ mm}$$

podle upraveného vztahu (14)

$$\varphi_{23} = \frac{190 - 0,5}{190} = \underline{\underline{1,763}} > \varphi_0 = 0,733$$

Podmínka pro vzdálenost okrajů d a d_1

$$l = r_1 - \frac{d_1}{2} - \frac{d}{2} \quad d_1 = 358 \text{ mm (Obr. 6.6)} \quad (28)$$

$$l = 740 - \frac{358}{2} - \frac{15}{2} = \underline{\underline{183,5 \text{ mm}}} < l_c = 158,2 \text{ mm}$$

podmínka vyhovuje, otvory d a d_1 považujeme za řadu otvorů

Součinitel snížení pevnosti řadou otvorů d a d_1

$$d_n = \frac{d_1 + d}{2} \quad (29)$$

$$d_n = \frac{358 + 15}{2} = \underline{\underline{186,5 \text{ mm}}}$$

$$\varphi = \frac{r_1 - d_n}{R_1} \quad (30)$$

$$\varphi = \frac{740 - 186,5}{740} = \underline{\underline{0,7277}}$$

Minimální zpevňující plocha pro otvory d_1 a d

podle upraveného vztahu (16)

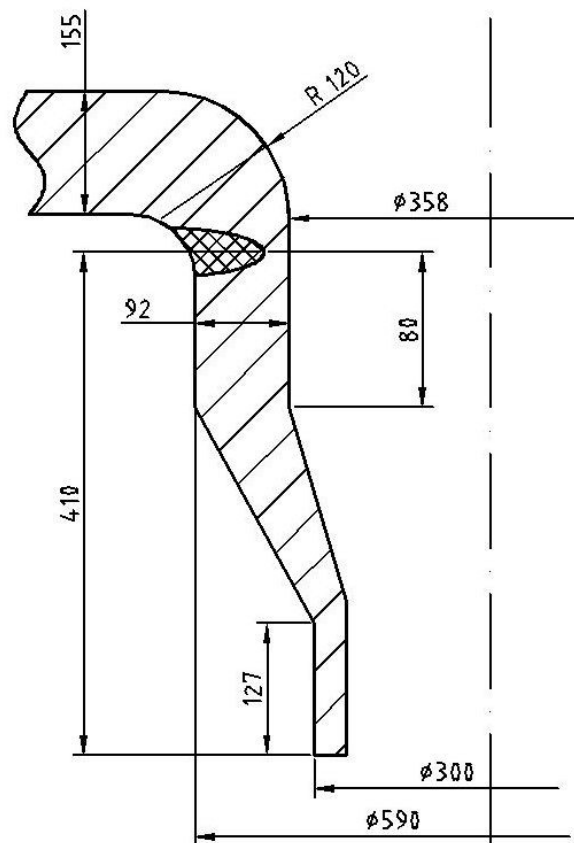
$$\Sigma A = \frac{[(0,733 - 0,7277) \cdot (140 - 15) \cdot 201,5]}{1 - 0,7277} = \underline{\underline{180,4 \text{ mm}^2}}$$

6.4.1 Nátrubek přívodu primárního chladiwa

Výpočet tloušťky s_{R3}

podle upraveného vztahu (3)

$$s_{R1} = \frac{18 \cdot 358}{2 \cdot 188,5 - 8} = \underline{\underline{8 \text{ mm}}}, \quad c = 0 \text{ mm}$$



Obr. 6.10 – Nátrubek přívodu primárního chladiva

Nominální tloušťku volím stejnou jako na vrchním dně

$$S_N = 98,5 \text{ mm}$$

Výška zpevněné části nátrubku

Podle vztahu (18)

$$h_s = \sqrt{(590 - 18,5) \cdot 98,5} = \underline{\underline{220 \text{ mm}}}$$

$$d_{as} = 590 \text{ mm (Obr. 6.10)}$$

Plocha vyztužující nátrubek

$$\Sigma A_s = 1 \cdot h_s \cdot (S_{N1} - R_1 - \dots) \quad (31)$$

$$\Sigma A_s = 1 \cdot 220 \cdot (98,5 - 8 - \dots) = \underline{\underline{15420 \text{ mm}^2}}$$

6.4.2 Nátrubek elektroohřívачů

Tento nátrubek je zhotoven ze dvou materiálů. Uvnitř nádoby je použit materiál 08Ch18N10T (austenitická chromniklová ocel) a na vnější části je použit materiál 10GN2MFA (nizkolegovaná konstrukční ocel).

Pro materiál 08Ch18N10T určím σ_{-1} .

$R_p = 177 \text{ MPa}$ a $R_m = 353 \text{ MPa}$. Zjištěno z tabulky (Tab. 5.6)

$$\sigma_{-p} = \frac{R_p}{n_p} = \frac{177}{1,5} = \underline{\underline{118 \text{ MPa}}} \quad \text{dle vztahu (1,2)}$$

$$\sigma_{-m} = \frac{R_m}{n_m} = \frac{353}{2,6} = \underline{\underline{136 \text{ MPa}}}$$

σ_{-1} (výpočtová hodnota) = 118 MPa

Dle lit. [5]

n_p součinitel bezpečnosti na mezi kluzu volím 1,5

n_m součinitel bezpečnosti na mezi pevnosti volím 2,6

Podle vztahu (3) a tabulky (Tab. 6.1) určím s_R

$$s_R = \frac{18 \cdot 45}{2 \cdot (118 - 8)} = \underline{\underline{1,1 \text{ mm}}} \quad c = 0 \text{ mm}$$

Nominální tloušťku nátrubku volím $s_N = 15 \text{ mm}$

Výška zpevněné části nátrubku

Podle vztahu (18)

$$h_s = \sqrt{(45 - 5) \cdot 45} = \underline{\underline{40 \text{ mm}}}$$

$d_{as} = 45 \text{ mm}$ (Obr. 6.6)

Vyztužená plocha nátrubku

$$A_S = \pi \cdot h_S \cdot (s_N - s_R) \quad (32)$$

$$A_S = \pi \cdot 30 \cdot (15 - 1) = \underline{\underline{554 \text{ mm}^2}}$$

Jelikož jsou tyto nátrubky dva (uvnitř spodního dna a vně spodního dna), celkovou vyztuženou plochu spočteme jako:

$$\Sigma A_S = 2 \cdot A_S \quad (33)$$

$$\Sigma A_S = 2 \cdot 554 = \underline{\underline{308 \text{ mm}^2}}$$

Plocha zpevňujících nátrubků otvoru d_1 a d_2

$$\Sigma A_{n,d} = \frac{\Sigma A_{ch} + \Sigma A_{ch}}{2} \quad (34)$$

$$\Sigma A_{n,d} = \frac{35420 + 308}{2} = \underline{\underline{8364 \text{ mm}^2}}$$

Kontrola zpevnění spodního dna

$$\Sigma A_{n,d} \geq \Sigma A_{min}$$

$$18364 \text{ mm}^2 \geq 180,4 \text{ mm}^2$$

Otvory spodního dna jsou zpevněny dostatečně.

7. Návrh sprchového systému [3]

Pro výpočet sprchového systému předpokládám tlak 16,3 MPa, kdy je průtok sprchami maximální $\dot{m}_s = 35 \text{ kg/s}$. pojistné ventily jsou uzavřeny $\dot{m}_v = 0$, elektroohřívače nepracují $\dot{m}_e = 0$, množství přitékajícího respektive odtékajícího primárního chladiva z KO se rovná $(\dot{m}_p + \dot{m}_r) = 0$.

Při výpočtu vycházím z rovnic 4.2-4-5-6-7-8-14-15 z matematického modelu KO.
Kapitola 4

Vstupní údaje pro výpočet:

Tab. 7.1

| | | | | | |
|-------|----------|-----------------|------------|-------------------------|-------------------------|
| T'' | 348,3 | °C | L | 6,6 | m |
| T_s | 346 | °C | m_2 | 2046,7 | kg |
| T_1 | 348,1 | °C | S_1 | 30,82 | m^2 |
| v'' | 0,009029 | kg/m^3 | S_2 | 4,95 | m^2 |
| v_1 | 0,001727 | kg/m^3 | α_1 | 0,3 | $\text{kW/m}^2\text{K}$ |
| i'' | 2573 | kJ/kg | α_2 | 100 | $\text{kW/m}^2\text{K}$ |
| i' | 1662 | kJ/kg | E_3 | $6,8256 \times 10^{-4}$ | |
| I_s | 1290 | kJ/kg | Δp | 0,116 | |

Tepelný výkon přecházející z páry do stěny:

$$P_1 = \alpha_1 \cdot S_1 \cdot (T'' - T_s)$$

$$P_1 = 0,3 \cdot 30,82 \cdot (348,3 - 346) = \underline{\underline{1,266 \text{ kW}}}$$

Hmotový tok kondenzátu ze stěn:

$$\dot{m}_k = \frac{P_1}{i'' - i'}$$

$$\dot{m}_k = \frac{1,266}{2573 - 1662} = \underline{\underline{0,000492 \text{ kg/s}}}$$

Tepelný výkon přecházející z páry do vody při kondenzaci páry na vodní hladině:

$$P_2 = \alpha \cdot S_2 \cdot (T'' - T')$$

$$P_2 = 0,00495 \cdot (348,3 - 48,1) = \underline{\underline{0,9 \text{ kW}}}$$

Hmotový tok kondenzátu vzniklého kondenzací na hladině:

$$\dot{m}_h = \frac{P_2}{i'' - i'}$$

$$\dot{m}_h = \frac{99}{2573 - 662} = \underline{\underline{0,109 \text{ kg/s}}}$$

Maximální průtok sprchovým systémem:

Vztah pro průtok sprchovým systémem získám tak, že do rovnice pro \dot{p} (4.14) dosadím vztahy m_1 a m_2 (4.2, 4.15) a algebraickými úpravami dostanu tento vzorec.

$$\dot{m} = \frac{\frac{\dot{p} \cdot m_2 \cdot E_3}{v'' - v'} + i_k + i_h}{\frac{i'' - i'}{i'' - i'} + \frac{v_1}{v'' - v'}} \quad (35)$$

$$\dot{m} = \frac{\frac{0,116 \cdot 2046,7 \cdot 5,8256 \cdot 10^{-3}}{0,009029 - 0,001727} + 0,0233 + 0,109}{\frac{1662 - 290}{2573 - 662} + \frac{0,001727}{0,009029 - 0,001727}} = \underline{\underline{0,462 \text{ kg/s}}}$$

Při zvýšení tlaku o $\Delta p = 0,116$ je nutný maximální průtok sprchovým systémem $\dot{m}_s = 35 \text{ kg/s}$

8. Návrh elektroohřivačů [3]

Pro výpočet elektroohřivačů předpokládáme pokles tlaku v primárním okruhu na hodnotu $p = 15,2$ MPa, kdy je výkon elektroohřivačů maximální $P_e = 1940$ kW. Odvod páry pojistnými ventily $\dot{m}_v = 0$, množství vody přitékající sprchovým systémem $\dot{m}_s = 0$ a tím i množství vody zkondenzované na sprchových kapkách $\dot{m}_{ch} = 0$. Množství přitékajícího respektive odtékajícího primárního chladiva z KO se rovná $(\dot{m}_p + \dot{m}_r) = 0$.

Při výpočtu vycházím z rovnic 4.2-4-5-6-7-8-14-15 z matematického modelu KO.
Kapitola 4

Vstupní údaje pro výpočet:

Tab. 8.1

| | | | | | |
|-------|----------|----------|------------|----------------------|-----------|
| T'' | 343,2 | °C | L | 6,6 | m |
| T_s | 341,2 | °C | m_2 | 1822,5 | kg |
| T_1 | 343 | °C | S_1 | 30,82 | m^2 |
| v'' | 0,01014 | kg/m^3 | S_2 | 4,95 | m^2 |
| v' | 0,001668 | kg/m^3 | α_1 | 0,3 | kW/m^2K |
| i'' | 2606 | kJ/kg | α_2 | 100 | kW/m^2K |
| i' | 1618 | kJ/kg | E_3 | $8,1 \times 10^{-4}$ | |
| | | | Δp | 0,011 | |

Hodnoty m_k a m_h dostaneme pomocí shodných vztahů jako při návrhu sprchového systému.

$$P_1 = 1,3 \cdot 30,82 \cdot (343,2 - 41,2) = \underline{\underline{8,49 \text{ kW}}}$$

$$\dot{m}_k = \frac{18,49}{2606 - 618} = \underline{\underline{1,019 \text{ kg/s}}}$$

$$P_2 = 0,001668 \cdot 4,95 \cdot (343,2 - 43) = \underline{\underline{9 \text{ kW}}}$$

$$\dot{m}_h = \frac{99}{2606 - 618} = \underline{\underline{1,1 \text{ kg/s}}}$$

Maximální výkon elektroohřivačů

Vztah pro výkon elektroohřivačů získám tak, že do rovnice pro \dot{p} (4.14) dosadím vztahy m_1 , m_2 a m_e (4.2, 4.15, 4.4) a algebraickými úpravami dostanu tento vzorec.

$$P_e = \left(\frac{\dot{p} \cdot m_2 \cdot E_3}{v'' - v'} + i_k + i_h \right) (i'' - i') \quad (36)$$

$$P_e = \left(\frac{0,11 \cdot 1822,5 \cdot 3,1 \cdot 10^{-3}}{0,01014 - 0,001668} + 0,019 + 0,1 \right) (2606 - 618) = \underline{\underline{1011,2 \text{ kW}}}$$

Maximální výkon elektroohřivačů volím 1940 kW tento výkon je dostačující.

Při snížení tlaku o $\Delta p = 0,011$, je nutný maximální výkon elektroohřivačů $P_e = 1940 \text{ kW}$. Systém těchto elektroohřivačů je rozdělen do čtyř skupin s výkonem 210, 210, 550 a 970 kW, které jsou zapínány regulátorem tlaku při poklesu tlaku pod nominální hodnotu. (Viz. Obr. 4,1 Provozní charakteristiky)

8.1 Výpočet elektroohřivačů [6,7]

Volené vstupní hodnoty:

Tab. 8.2

| | | | | | |
|----|-----|----|----------------|-------|-------------------------------------|
| L | 220 | cm | ρ (500°C) | 1,158 | $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ |
| d | 2,8 | mm | Q_c | 1940 | kW |
| h | 0,5 | cm | n | 50 | |
| ds | 1 | cm | dU_1 | 23,7 | V |
| | | | U | 380 | V |

Materiál volím slitina 20% Cr a 80% Ni, pracovní teplota 500°C

Výpočet výkonu jednoho ohřivače:

$$Q_j = \frac{Q_c}{n} \quad (37)$$

$$Q_j = \frac{1940}{50} = \underline{\underline{38,8 \text{ kW}}}$$

Navrhovaná délka topného odporu:

$$l_d = \left(\frac{L}{h} \right) \sqrt{(\pi \cdot ds)^2 + 1^2 + 1} \quad (38)$$

$$l_d = \left(\frac{220}{0,5} \right) \sqrt{(\pi \cdot 1)^2 + 1,5^2 + 1} = \underline{\underline{620 \text{ cm}}}$$

Zdrojové teplo:

$$Q = \frac{4 \cdot Q_j}{\pi \cdot d^2 \cdot l_d} \quad (39)$$

$$Q = \frac{4 \cdot 38800}{\pi \cdot 2,8^2 \cdot 1620} = \underline{\underline{1,89 \text{ W/cm}^3}}$$

Tepelný tok na povrchu vodiče:

$$P_1 = Q \cdot \frac{d}{4} \quad (40)$$

$$P_1 = 1,89 \cdot \frac{2,8}{4} = \underline{\underline{1,32 \text{ W/cm}^2}}$$

Úbytek napětí:

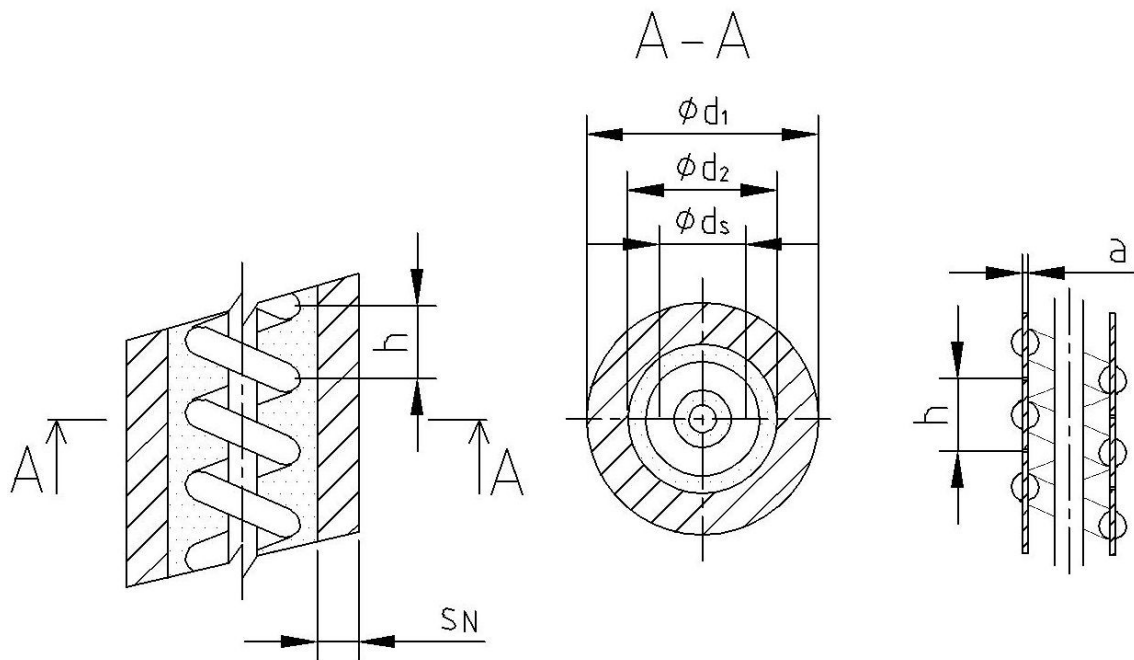
$$dU = dU_1 \cdot \sqrt{P_1} \cdot \sqrt{\rho} \quad (41)$$

$$dU = 13,7 \cdot \sqrt{2,72} \cdot \sqrt{1,158} = \underline{\underline{12,09 \text{ V}}}$$

8.2 Kontrola pracovní teploty a tepelných toků [6,7]

Tab. 8.3 Vstupní hodnoty

| | | | | | |
|----------------|------|----|------------------|-------|------|
| d ₁ | 2,4 | cm | λ ₃₅₀ | 20,3 | W/mK |
| d ₂ | 1,8 | cm | λ ₄₁₅ | 15,9 | W/mK |
| d ₃ | 1,12 | cm | λ ₄₅₅ | 21,5 | W/mK |
| d ₄ | 0,88 | cm | λ ₄₉₅ | 14 | W/mK |
| d ₅ | 0,28 | cm | λ ₅₂₀ | 22,4 | W/mK |
| | | | L | 220 | cm |
| | | | Q _j | 38800 | W |



Obr. 8.1 – Řez elektroohříváku a znázornění náhrady kruhového průřezu obdélníkovým

$$q_1 = \frac{Q_j}{\pi d_1 \cdot L} \quad (42)$$

$$q_1 = \frac{38800}{\pi \cdot 2,4 \cdot 220} = \underline{\underline{23,4 \text{ W/cm}^2}}$$

$$t_{s1} = \underline{\underline{350^\circ\text{C}}}$$

$$q_2 = \frac{Q_j}{\pi d_2 \cdot L} \quad (43)$$

$$q_2 = \frac{38800}{\pi \cdot 1,8 \cdot 220} = \underline{\underline{31,20 \text{ W/cm}^2}}$$

$$t_{s2} = \frac{q_1 \cdot r_2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_2}}{\lambda_{\text{0}}} + t_{s1} \quad (44)$$

$$t_{s2} = \frac{23,4 \cdot 10^4 \cdot 0,009 \cdot \ln \frac{0,012}{0,009}}{20,3} + 350 = \underline{\underline{380^\circ\text{C}}}$$

$$q_3 = \frac{Q_j}{\pi \cdot d_3 \cdot L} \quad (45)$$

$$q_3 = \frac{38800}{\pi \cdot 1,12 \cdot 220} = \underline{\underline{50,15 \text{ W/cm}^2}}$$

$$t_{s3} = \frac{q_2 \cdot r_3 \cdot \ln \frac{r_2}{r_3}}{\lambda_{s5}} + t_{s2} \quad (46)$$

$$t_{s3} = \frac{31,20 \cdot 10^4 \cdot 0,0056 \cdot \ln \frac{0,009}{0,0056}}{15,9} + 380 = \underline{\underline{433^\circ \text{C}}}$$

$$q_4 = \frac{Q \cdot \frac{d_5}{4} \cdot \pi \cdot d_5 \cdot L}{\pi \cdot d_4 \cdot L} = \frac{Q \cdot d_5^2}{4 \cdot d_4} \quad (47)$$

$$q_4 = \frac{389 \cdot 0,28^2}{4 \cdot 0,88} = \underline{\underline{3,66 \text{ W/cm}^2}}$$

$$t_{s4} = \frac{q_3 \cdot r_4 \cdot \ln \frac{r_3}{r_4}}{\lambda_{s5}} + t_{s3} \quad (48)$$

$$t_{s4} = \frac{50,15 \cdot 10^4 \cdot 0,0044 \cdot \ln \frac{0,0056}{0,0044}}{21,5} + 433 = \underline{\underline{458^\circ \text{C}}}$$

$$q_5 = \frac{Q \cdot \frac{d_5}{4} \cdot \pi \cdot d_5 \cdot L}{\pi \cdot d_5 \cdot L} = \frac{Q \cdot d_5}{4} \quad (49)$$

$$q_5 = \frac{389 \cdot 0,28}{4} = \underline{\underline{27,24 \text{ W/cm}^2}}$$

$$t_{s5} = \frac{q_4 \cdot r_4 \cdot \ln \frac{r_4}{r_5}}{\lambda_{s5}} + t_{s4} \quad (50)$$

$$t_{s5} = \frac{8,66 \cdot 10^4 \cdot 0,0044 \cdot \ln \frac{0,0044}{0,0014}}{14} + 458 = \underline{\underline{490^\circ \text{C}}}$$

$$t_0 = \frac{Q}{4 \cdot \lambda_0} \cdot r_5^2 + t_{s5} \quad (51)$$

$$t_0 = \frac{389}{4 \cdot 22,4} \cdot 1,4^2 + 490 = \underline{\underline{499^\circ \text{C}}}$$

Při řešení prostupu tepla jsem užil náhradu spirály za prstencovou válcovou stěnu, přičemž kruhový průřez je rovnoplochy s průřezem náhradním – obdélníkovým.

Výšku obdélníka jsem zvolil $h = 0,5\text{cm}$. (52,53)

$$\begin{aligned} a &= \frac{S}{h} & S &= \frac{\pi \cdot d_5^2}{4} \\ a &= \frac{5,16}{5} & S &= \frac{\pi \cdot 2,8^2}{4} \\ a &= \underline{\underline{,232 \text{ mm}}} & S &= \underline{\underline{,16 \text{ mm}^2}} \end{aligned}$$

Průměry d_3 a d_4 :

$$\begin{aligned} d_3 &= l_s + t = 0 + ,232 = \underline{\underline{1,2 \text{ mm}}} \\ d_4 &= l_s - t = 0 - ,232 = \underline{\underline{,8 \text{ mm}}} \end{aligned} \quad (54,55)$$

Střední pracovní teplota:

$$\begin{aligned} t_{str} &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t_{s3} + t_{s4}}{2} + \frac{t_{s5} + t_0}{2} \right) \\ t_{str} &= \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{433 + 458}{2} + \frac{490 + 499}{2} \right) = \underline{\underline{470^\circ \text{C}}} \end{aligned} \quad (56)$$

Střední pracovní teplota $t_{str} = 470^\circ \text{C}$ je menší než předem zvolená hodnota 500°C , pro kterou byl určen odpor ρ . Maximální teplotu dosáhne elektroohřívák v $t_0 = 499^\circ \text{C}$. A protože navržený materiál umožní užití do pracovní teploty 1050°C , je možné jej použít.

8.3 Návrh pláště elektroohříváku [5]

Materiál pláště volím 38ChN3MFA (viz. Tab. 5.4)

$$R_m = 745 \text{ MPa}$$

$$R_p = 635 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{-p} = \frac{R_p}{n_p} = \frac{635}{2} = \underline{\underline{317,5 \text{ MPa}}} \quad \text{podle vztahu (1,2)}$$

$$\sigma_{-m} = \frac{R_m}{n_m} = \frac{745}{2,6} = \underline{\underline{286,5 \text{ MPa}}}$$

$$\sigma_{-} \text{ (výpočtová hodnota)} = \underline{\underline{286,5 \text{ MPa}}}$$

Dle literatury [5]

n_p součinitel bezpečnosti na mezi kluzu volím 2

n_m součinitel bezpečnosti na mezi pevnosti volím 2,6

Výpočtová tloušťka stěny dna elektroohříváku

$$s_R = \zeta \cdot d_2 \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_{-}}} \quad d_2 = 18 \text{ mm (Obr. 8.1)} \quad (57)$$

$$s_R = 0,35 \cdot 18 \cdot \sqrt{\frac{18}{286,5}} = 1,6 \text{ mm} \quad \text{součinitel } K = 0,35$$

Nominální tloušťka stěny dna elektroohříváku

$$c = 1,4 \text{ mm}$$

$$s_N = s_R + c$$

$$s_N = 1,6 + 1,4 = 3 \text{ mm}$$

Podmínky platnosti

$$\frac{s_N - c}{d_2} \leq 1,1 \quad \text{podle vztahu (9)}$$

$$\frac{3 - 0,4}{18} = 1,089 \leq 1,1$$

Výpočtová tloušťka stěny pláště elektroohříváku

Dle vzorce (3)

$$s_R = \frac{18 \cdot 18 \cdot 1}{1 \cdot (2 \cdot 286,5 \cdot 1 - 8)} \quad \text{pro } \varphi = 1$$

$$s_R = 1,58$$

Nominální tloušťka stěny elektroohříváku

$$c = 2,42 \text{ mm}$$

$$s_N = s_R + c$$

$$s_N = 0,58 + 2,42 = 3 \text{ mm}$$

Podmínky platnosti

$$\frac{s_N - c}{d_2} \leq 1,3$$

$$\frac{3 - 0,42}{18} = 1,032 \leq 1,3$$

Podmínka vyhovuje

9. Postup svařování kompenzátoru objemu [8]

9.1 Základní zásady svařování a navařování

Při výrobě KO 640 se dovolují následující způsoby svařování a navařování:

- svařování automatem pod tavidlem drátem
- navařování automatem pod tavidlem drátem nebo páskou
- ruční svařování nebo navařování elektrickým obloukem obalenými elektrodami
- ruční svařování nebo navařování el. obloukem v ochranné atmosféře argonu netavící se elektrodou
- automatické svařování el. obloukem v ochranné atmosféře argonu netavící se elektrodou

Dovoluje se při zhotovení jednoho svarového spoje nebo návaru použít několik způsobů svařování nebo navařování uvedených výše.

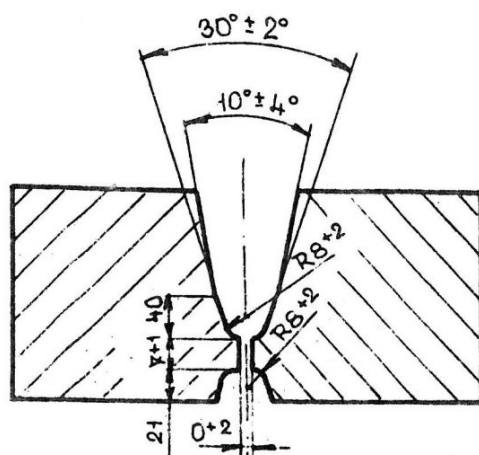
Svařování (navarování) se musí provádět v uzavřené hale při vyloučení průvanu a při teplotě okolního vzduchu vyšší než 5°C.

Při svařování mnohovrstvých svarů je nutné provést po zakončení každé housenky pečlivé očištění od strusky a rozstříku. Povrch svaru a k němu přilehlá oblast základního materiálu musí být vizuálně kontrolovány pro zajištění vad. Např. vruby, velké nerovnosti housenek, propadlá místa mezi housenkami, póry. Tyto vady se odstraní vybroušením.

9.1.1 Postup svařování obvodových svarů tělesa KO 640

Tyto svary budou na KO celkem 4. (svary A1, A2, A3, A4)

Sestavování a slícování svařovaných dílů se provádí pomocí skob. Skoby se přivařují na vnější povrch dílů za místního předehřevu min. 50°C elektrodami. Do svarového úkosu vnější strany, kde jsou přivařeny skoby, se vlepi podložná páska. Svařování se provádí automatem pod tavidlem nejdříve z vnitřní strany za předehřevu 120-250°C. Dále se odstraní skoby pálením, taktéž s předehřevem 120-250°C a odlepí se podložná páska. Provede se vizuální kontrola kořenové části a začne se svařovat z vnější strany.



Obr. 9.1 – Obvodový svar tělesa KO [8]

Po ukončení svařování svarového spoje se provede ihned mezioperační žihání na snížení pnutí. Teplotu materiálu v oblasti provedeného spoje udržujeme na teplotě předehřevu až do zahájení žihání na snížení pnutí. Teplota materiálu v oblasti svaru nesmí při dopravě na žihání klesnout pod 70°C. Po ukončení svařování v případě, že nelze okamžitě žíhat se provede dohřev (tepelné zotavení) při teplotě 150-250°C s výdrží minimálně 18 hodin a ochladí se materiál v oblasti svarových spojů na teplotu 10°C. Místní mezioperační žihání na snížení pnutí se zahájí nejpozději do 100 hodin od ukončení tepelného zotavení.

Provedení kontrol svarového spoje:

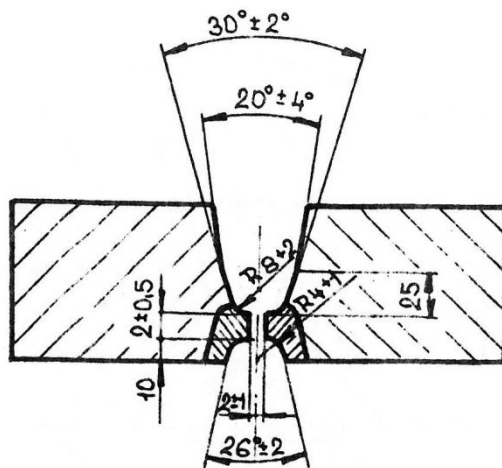
- kontrola vizuální
- kontrola rozměrů
- kontrola magnetickou metodou
- kontrola ultrazvukem
- kontrola prozářením

Po kontrole svarového spoje se provede zmíněné žihání na snížení pnutí poloviny tělesa KO. Po tomto žihání se opět provede kontrola svarového spoje.

9.1.2 Postup svařování závěrného obvodového svaru (svar B)

Obě poloviny tělesa KO jsou ve stavu po ukončení žihání na snížení pnutí s vyhovujícími výsledky požadovaných kontrol. Svarové plochy závěrného obvodového svaru jsou na straně úkosu z vnitřní strany tělesa opatřeny nízkouhlíkovým návarem.

Slicování a sestehování obou polovin tělesa KO se provádí z vnitřní strany tělesa ručním svařováním elektrickým obloukem obalenými elektrodami bez předehřevu. Proveďte se vizuální kontrola kořenové části svaru. Svařování z vnější strany tělesa se provádí automatem pod tavidlem za předehřevu 120-250°C do vyplnění svarového úkosu.



Obr. 9.2 – Obvodový závěrný svar KO [8]

Po ukončení svařování se provede dohřev (tepelné zotavení) při teplotě 150-250°C s výdrží 18 hodin a ochladí se materiál v oblasti svarových spojů na teplotu 10°C. Místní mezioperační žihání na snížení pnutí se zahájí nejpozději do 100 hodin od ukončení tepelného zotavení. Dále se provedou již zmíněné kontroly svarového spoje.

9.2 Kompletace kompenzátoru objemu

Přehled austenitických návarů na KO 640

Návar C – návar na vnitřních plochách kroužků, dnech, víku průlezu, nátrubků

Návar D – návar na hrany nátrubků

Návar E – návar na vnějším povrchu pláště

Návar F – návar na vnitřní povrch pláště pro přivaření vložek.

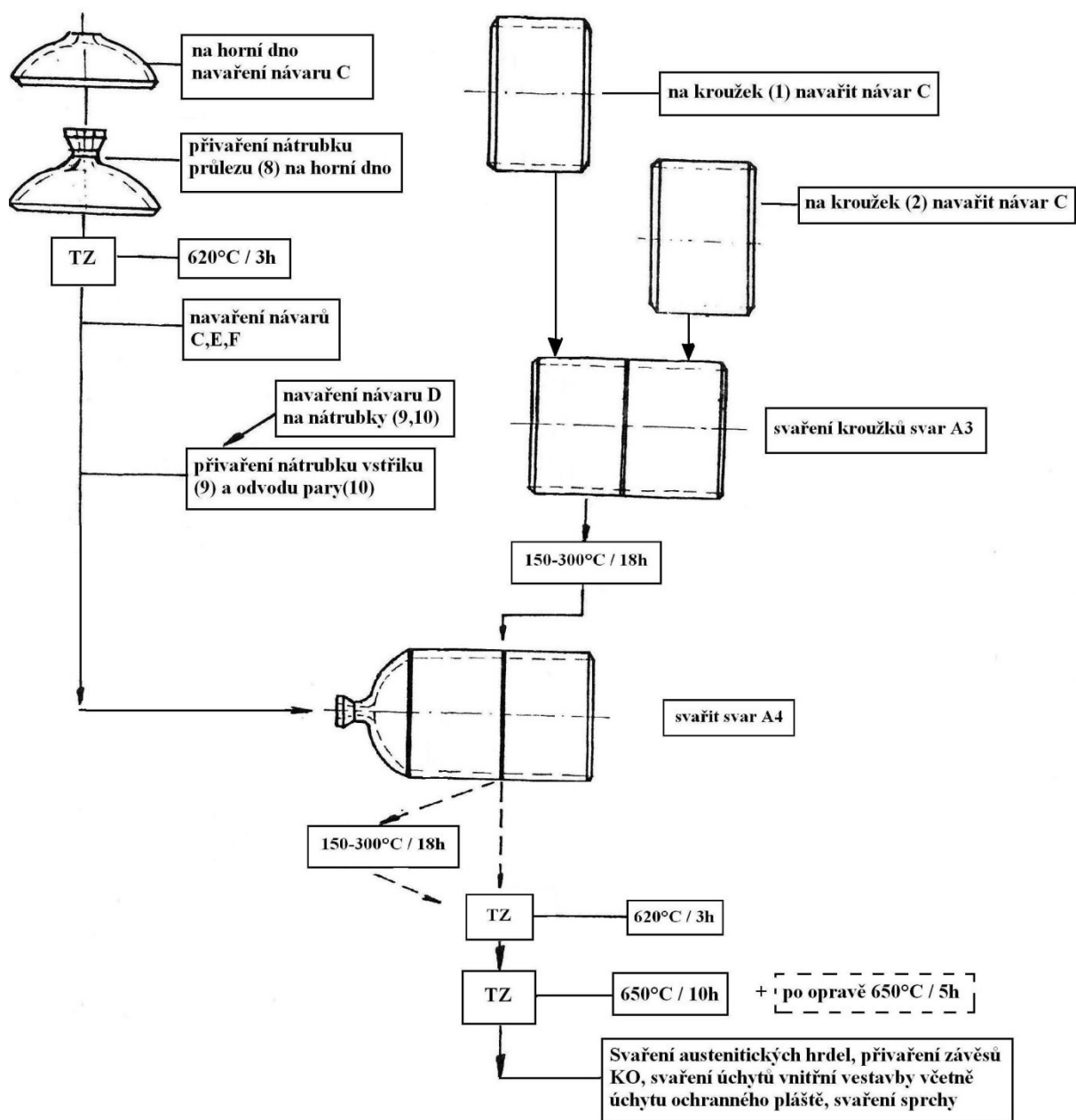
Kompletace spodní poloviny KO

- Navaření antikorozního návaru C na spodní dno.
- Přivaření horní části podstavce ke spodnímu dnu (6, Obr. 6.1). Po svaření z vnější i vnitřní strany se provede dohřev na 150-300°C minimálně po dobu 8 hodin.

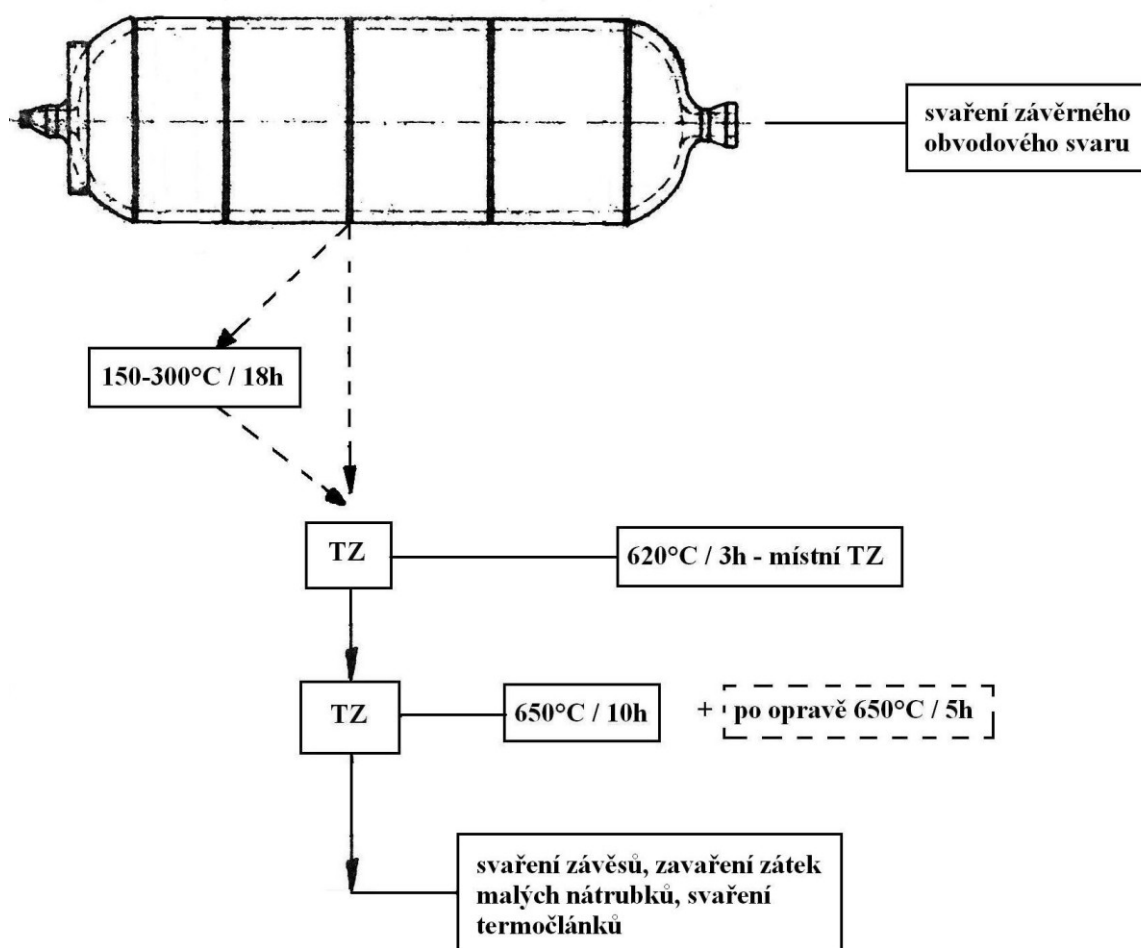
- c) Přivaření nátrubku (7), do mezioperačního tepelného zpracování (žíhání) udržovat teplotu $T > 70^{\circ}\text{C}$. Na nátrubku přívodu primárního chladiva ve fázi přivařování ke dnu, jsou již navařeny austenitické návary C, D, F
- d) Provést tepelné zpracování, 620°C po dobu 3 hodin.
- e) Na kroužek 3 a kroužek 4 (Obr. 6.1) navařit antikorozi návar C.
- f) Svaření obou kroužků svarem A2. Okamžitě po svaření provést dohřev $150\text{--}300^{\circ}\text{C}$ po dobu 18 hodin.
- g) Svaření spodního dna s nátrubkem spolu se svařenými kroužky svarem A1 a opět provést dohřev $150\text{--}300^{\circ}\text{C}$ po dobu 18 hodin.
- h) Konečné tepelné zpracování (KTZ) celé poloviny KO se provádí při teplotě 650°C po dobu 10 hodin. Opakované KTZ po případných opravách se provádí při teplotě 650°C po dobu 5 hodin.
- i) Svařit vložky otvorů elektroohříváčů (bez dohřevu), zavaření čepu v úchytech na spodním dně, svaření austenitických hrdel s nátrubky a s návarem na vnitřních plochách pláště (bez dohřevu), svaření krytu nátrubku přívodu chladiva.

Kompletace horní poloviny KO

- a) Na kroužky 1 a 2 navařit antikorozi návar C.
- b) Navaření antikorozi návaru C na horní dno (5).
- c) Svaření nátrubku průlezu (8) s horním dnem a pak se provede tepelné zpracování při teplotě 620°C po dobu 3 hodin.
- d) Navaření vnitřního návaru C na hrdle průlezu.
- e) Na nátrubku navařit návary E a F (bez dohřevu).
- f) Svařování nátrubků přívodu sprchové vody a odvodu páry (9,10), dohřev $150\text{--}250^{\circ}\text{C}$ po dobu 8 hodin. Nátrubky se k vrchnímu dnu přivařují s již navařeným návarem D (po navaření není dohřev)
- g) Svaření obou kroužků svarem A3. Okamžitě po svaření provést dohřev $150\text{--}300^{\circ}\text{C}$ po dobu 18 hodin.
- h) Svaření horního dna s nátrubky spolu se svařenými kroužky svarem A4 a opět provést dohřev $150\text{--}300^{\circ}\text{C}$ po dobu 18 hodin.
- i) KTZ celé poloviny KO se provádí při teplotě 650°C po dobu 10 hodin. Opakované KTZ po případných opravách se provádí při teplotě 650°C po dobu 5 hodin.
- j) Svaření austenitických hrdel na vnitřních plochách pláště, přivaření závěsů KO bližších hornímu dnu, svaření úchytní vnitřní vestavby včetně úchyty ochranného pláště, svaření sprchy.



Obr. 9.4 - Kompletace horní poloviny KO [8]



Obr. 9.5 - Kompletace KO [8]

10. Závěr

V diplomové práci je řešen konstrukční projekt kompenzátoru objemu včetně svislých elektroohříváčů pro jadernou elektrárnu VVER 640. V kapitole 4, ve které jsou mimo jiné znázorněny provozní charakteristiky jednotlivých částí kompenzátoru (pojistné ventily, sprchy, elektroohříváče), můžeme vidět mezi jakými tlaky a průtoky (v případě elektroohříváčů výkony) daný kompenzátor pracuje. Maximální výkon elektroohříváčů je 1940 kW a tento výkon se spouští, pokud tlak v KO klesne pod hranici 15,2 MPa. Tento výkon by měl být dostačující, aby se tlak v KO začal opět navyšovat.

V kapitole 6 jsou uvedeny pevnostní výpočty stěny pláště. Tloušťka stěny horního dna vychází 117 mm. Při výpočtu tloušťky stěny spodního dna, se musel brát ohled na velké množství otvorů a větší zatížení. Z toho to důvodu vychází tloušťka stěny větší a je zvolena na 140 mm.

Při výpočtu elektroohříváčů jsem vycházel z celkového výkonu 1940kW, z rozměrů topné spirály a bral jsem ohled na zvolený materiál spirály, kterým je slitina 20% Cr a 80% Ni, pracovní teplota pro tento materiál je 500°C. Danými výpočty bylo zjištěno, že střední pracovní teplota vychází 470°C, tudíž zvolený materiál vyhovuje a lze jej použít.

Seznam použité literatury

- [1] HEJZLAR, R. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Praha : ČVUT, 1994
- [2] *Technet* [online]. 2007 [cit. 2011-02-23]. Modernizace jaderné elektrárny Temelín. Dostupné z WWW: http://technet.idnes.cz/exkluzivni-fotoreportaz-z-modernizace-jaderne-elektrarny-temelin-1fb-/tec_reportaze.asp?c=A070827_101055_tec_reportaze_rja
- [3] MIŠÁK, J. *Matematické modelování procesů v kompenzátoru objemu VVER*.
Výzkumný ústav jaderných elektráren
- [4] FOJTA, HERZÁNOVÁ. *Specifikace konstrukčních materiálů KO*. Vítkovice, 1982
- [5] *Normalizace v jaderné technice*. Ústřední informační středisko pro jaderný program, 1988
- [6] RADA, J. *Elektrotepelná technika*. Praha: SNTL, 1985
- [7] HRADÍLEK, Z. *Elektrické teplo*. VŠB-TU Ostrava, 1989
- [8] BARTEK. *Technologická směrnice pro svařování a navařování a tepelné zpracování svarových spojů kompenzátoru objemu*. Vítkovice, 1986

Přílohy

- I – CD: Diplomová práce
- II – Výkres: Kompenzátor objemu FS-312-01
- III – Výkres: Svislý elektroohřívač FS-312-02